



Diseño de planes de evacuación ante emergencias considerando el comportamiento dinámico de peatones basado en simulación microscópica

Kelly Andrea Rendón Rozo

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Industrial, División de Ingenierías

Barranquilla, Colombia

2017

Diseño de planes de evacuación ante emergencias considerando el comportamiento dinámico de peatones basado en simulación microscópica

Kelly Andrea Rendón Rozo

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Industrial

Director:

Alcides R. Santander Mercado Ph.D.

Codirector:

Julián A. Arellana Ochoa Ph.D.

Grupos de Investigación:

Productividad y Competitividad

TRANVIA

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Industrial, División de Ingenierías

Barranquilla, Colombia

2017

Aprobado por el profesorado de la División de Ingenierías en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magister en Ingeniería Industrial

Ing. Alcides R. Santander Mercado

Firma del Director

Ing. Julián A. Arellana Ochoa

Firma del Codirector

Ing. René A. Amaya Mier

Firma del Evaluador

Ing. Rubén D. Yie Pinedo

Firma del Evaluador

Barranquilla, Diciembre, 2017

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	IX
Lista de tablas	XI
Lista de anexos	XII
Resumen	13
1. Introducción	15
1.1 Planteamiento del Problema de Investigación	16
1.2 Justificación.....	19
1.2.1 Teórica	19
1.2.2 Práctica	21
1.3 Objetivos	22
1.3.1 General.....	22
1.3.2 Específicos	22
1.4 Metodología Propuesta	23
2. Marco Teórico y Estado del Arte	25
2.1 Reglas de decisión para el movimiento de peatones.....	25
2.2 Posibles factores que influyen el comportamiento de peatones.....	26
2.3 Modelos de simulación de evacuaciones	28
2.3.1 Modelos de optimización	28
2.3.2 Modelos de simulación	29
2.3.3 Evaluación de riesgos.....	30
2.4 Enfoques de modelación.....	30
2.4.1 Modelos de fuerza social	31
2.4.2 Modelos de autómata celular	31
2.4.3 Modelos de teoría de juegos.....	32
2.4.4 Modelos basados en agentes	32
2.4.5 Modelos híbridos	33
2.5 Desarrollo del estado del arte.....	34
2.5.1 Clasificación por tipo de objetivo.....	35
2.5.2 Clasificación por tipo de entorno de simulación	35
2.5.3 Clasificación por caso de estudio.....	36
2.5.4 Clasificación por enfoque de modelación.....	37
2.5.5 Clasificación por tipo de métrica de evaluación	37

2.5.6	Clasificación por los factores que influyen en una evacuación o en el comportamiento de multitudes.....	38
3.	Modelo de evacuación ante emergencias	41
3.1	Descripción del Modelo	41
3.2	Calibración de patrones de comportamiento de los peatones en situaciones de emergencia.....	45
3.2.1	Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de las personas	46
3.2.2	Escenarios de simulación	50
4.	Modelo de evacuación en edificaciones.....	53
4.1	Análisis de la estructura	53
4.2	Cálculo del número óptimo de réplicas en una simulación	59
4.3	Resultados del caso de estudio con relación al tiempo total de evacuación	60
4.4	Resultados del caso de estudio con relación al número de personas afectadas.....	61
4.5	Análisis de sensibilidad del modelo de evacuación	62
4.5.1	Escenario 1.....	63
4.5.2	Escenario 2.....	64
4.5.3	Escenario 3.....	66
5.	Plan de evacuación propuesto.....	75
5.1	Diseño del plan de evacuación.....	76
5.1.1	Evaluación del proceso de elección de ruta en el piso 2	76
5.1.2	Evaluación del proceso de elección de ruta en el piso 3	83
5.1.3	Evaluación del proceso de elección de ruta en el piso 4	84
5.1.4	Cambio en la infraestructura del edificio	85
5.2	Descripción del plan de evacuación propuesto.....	89
6.	Conclusiones.....	97
	Bibliografía	103

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1:	Direcciones de movimiento según Von Neumann Neighborhood..... 25
Figura 2-2:	Direcciones de movimiento según Moore Neighborhood 26
Figura 2-3:	Clasificación por objetivo de la investigación 35
Figura 2-4:	Clasificación por tipo de entorno de simulación 36
Figura 2-5:	Clasificación por tipo de caso de estudio 36
Figura 2-6:	Clasificación por tipo de enfoque de modelación 37
Figura 2-7:	Clasificación por tipo de métrica de evaluación 38
Figura 2-8:	Clasificación por tipo de factores que influyen en la evacuación..... 39
Figura 3-1:	Plano del salón y ubicación de las cámaras..... 45
Figura 3-2:	Estructura del entorno, Bloque 25E 47
Figura 3-3:	Combinación ($\beta_1 - \beta_2$) vs. Tiempo de evacuación 50
Figura 3-4:	Combinación ($\beta_1 - \beta_2$) vs errores..... 51
Figura 4-1:	Planos del edificio Julio Muvdi, Universidad del Norte 54
Figura 4-2:	Estructura completa del edificio Julio Muvdi, Universidad del Norte..... 56
Figura 4-3:	Estructura por piso del edificio Julio Muvdi, Universidad del Norte 57
Figura 4-4:	Número de personas evacuadas según plan existente 62
Figura 4-5:	Número de personas a evacuar vs. Tiempo de evacuación (Fase 1)..... 65
Figura 4-6:	Número de personas a evacuar vs. Tiempo de evacuación (Fase 2)..... 66
Figura 4-7:	Zona 1: Segundo piso..... 67
Figura 4-8:	Zona 2: Segundo piso..... 69
Figura 4-9:	Zona 3: Segundo piso..... 70
Figura 4-10:	Zona 4: tercer piso..... 71
Figura 4-11:	Zona 5: tercer piso..... 72
Figura 5-1:	Análisis de evacuación por zonas (Piso 2)..... 76
Figura 5-2:	Análisis de la zona 1 77
Figura 5-3:	Análisis de la zona 2..... 78
Figura 5-4:	Análisis de la zona 3..... 79
Figura 5-5:	Análisis de la zona 4..... 81
Figura 5-6:	Análisis de la zona 5..... 82
Figura 5-7:	Análisis de la zona 6..... 84
Figura 5-8:	Elección de ruta en el tercer piso..... 85
Figura 5-9:	Bloqueo puerta segundo piso 86
Figura 5-10:	Habilitar puertas en el cuarto piso..... 88

Figura 5-11:	Plano de evacuación, piso 1	90
Figura 5-12:	Plano de evacuación, piso 2	90
Figura 5-13:	Plano de evacuación, piso 3	91
Figura 5-14:	Plano de evacuación, piso 4	92
Figura 5-15:	Número de evacuados según el plan propuesto	94

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Muertes accidentales según circunstancia del hecho en Colombia, 2014 .	17
Tabla 1-2: Lesiones accidentales según circunstancia del hecho en Colombia, 2014	18
Tabla 3-1: Distribución de los estudiantes por género	46
Tabla 3-2: Número de personas por ruta elegida	49
Tabla 3-3: Tiempo total de evacuación por combinación de factores	51
Tabla 4-1: Resultados del modelo existente en cuanto al tiempo de evacuación	61
Tabla 4-2: Resultados del número de evacuados según el plan existente	62
Tabla 4-3: Resumen de los resultados obtenidos en la prueba 1	63
Tabla 4-4: Tiempo total de evacuación en la fase 1	65
Tabla 4-5: Tiempo total de evacuación en la fase 2	66
Tabla 4-6: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 1	67
Tabla 4-7: Resultados Zona 1	68
Tabla 4-8: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 2	68
Tabla 4-9: Resultados Zona 2	69
Tabla 4-10: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 3.....	70
Tabla 4-11: Resultados Zona 3.....	70
Tabla 4-12: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 4.....	71
Tabla 4-13: Resultados Zona 4.....	72
Tabla 4-14: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 5.....	73
Tabla 4-15: Resultados Zona 5.....	73
Tabla 5-1: Experimentos zona 2.....	78
Tabla 5-2: Tiempo de evacuación vs congestión (zona 3).....	80
Tabla 5-3: Tiempo de evacuación vs congestión (zona 4).....	81
Tabla 5-4: Tiempo de evacuación vs congestión (zona 5).....	83
Tabla 5-5: Tiempo de evacuación vs congestión.....	83
Tabla 5-6: Resumen de resultados prueba cuarto piso	85
Tabla 5-7: Tiempo de evacuación al bloquear puerta en el segundo piso	87
Tabla 5-8: Tiempo de evacuación al habilitar puertas en el cuarto piso.....	88
Tabla 5-9: Tiempo de evacuación según el plan propuesto.....	92
Tabla 5-10: Tiempos de evacuación según plan existente y plan propuesto.....	93
Tabla 5-11: Número de evacuados según el plan propuesto	93
Tabla 5-11: Número de evacuados según el plan de evacuación	94

Lista de anexos

Pág.

Anexo 1: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque de fuerza social	113
Anexo 2: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque de autómatas celulares	115
Anexo 3: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque de teoría de juegos.....	119
Anexo 4: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque basado en agentes.....	120
Anexo 5: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando modelos híbridos.....	123
Anexo 6: Descripción del código.....	125

Resumen

Muchas personas mueren cada año en situaciones de emergencia por la ausencia de planes de evacuación eficientes. No contar con un plan de acción o contar con uno pero con errores en su diseño, implican mayores tiempos de evacuación que pueden poner en riesgo muchas vidas. Además, es común que las personas no acaten las señales de seguridad, ya que en condiciones de riesgo, estas reaccionan de manera imprevista a causa del pánico y la ansiedad por querer evacuar el lugar. Actualmente, los planes de evacuación indican una ruta de salida específica y no consideran la posibilidad de proponer rutas alternas en caso de bloqueos. Esta investigación tiene como objetivo el diseño de un plan de evacuación considerando aspectos del comportamiento de la persona y múltiples estrategias de enrutamiento.

Se escogió el enfoque de modelación basado en agentes para representar el comportamiento heterogéneo de las personas y la interacción entre ellos mismos y el entorno. Usando un edificio con presencia de rampas y escaleras como caso de estudio, se evaluó la elección de ruta y el comportamiento de los individuos en estructuras de múltiples niveles. Un modelo logit de elección de ruta se incorporó en la simulación para considerar el efecto de la distancia de recorrido y la densidad de las personas en las zonas de salida. La calibración del modelo se realizó a partir de simulacros de evacuación.

Los análisis de sensibilidad del modelo calibrado permitieron obtener un plan de evacuación dinámico que incorpora señalización especial para guiar a las personas a tomar rutas alternativas en situaciones de congestión. El plan dinámico también incluye la creación de salidas de emergencia como modificación a la estructura del edificio, dado que se encontró que la configuración de la infraestructura juega un papel importante en el tiempo total de evacuación. El plan dinámico entregó mejores resultados en cuanto a tiempo de evacuación y número de personas afectadas al ser comparado con un plan convencional sobre una estructura compleja. Los resultados de esta investigación refuerzan la necesidad de aplicar este tipo de metodologías en la etapa de planeación o

diseño de estructuras, con el fin de construir estructuras que disminuyan el número de personas afectadas durante una evacuación causada por eventuales condiciones de emergencia.

1. Introducción

La ausencia de un plan de evacuación integral puede afectar a una gran cantidad de personas, a diferentes grados de severidad; especialmente cuando las emergencias ocurren en espacios que no se encuentran preparados para facilitar que las personas tomen decisiones adecuadas durante una situación de evacuación (Abdelghany, Abdelghany, Mahmassani, & Alhalabi, 2014). Las personas pueden reaccionar de manera inesperada ante condiciones de pánico y caos en el entorno, pues generalmente buscan su propia seguridad y la opción para salir más rápido del lugar, pero ésta no es necesariamente la forma más segura de hacerlo. Los modelos actuales de evacuación entregan al usuario una ruta de salida (estática) de la edificación en donde se generó la emergencia. Sin embargo, son limitados en la representación de las condiciones que se presentan en una emergencia real, ignorando los distintos comportamientos que pueden tener las personas ante diversas condiciones de peligro.

El diseño de rutas seguras dentro de una edificación debe reducir al mínimo la congestión durante la evacuación, impidiendo que dé un aumento en el tiempo total de evacuación y el riesgo de lesiones ocasionados por la dinámica de la multitud (Lightfoot & Milne, 2003). Lo anterior conlleva a la necesidad de identificar y representar la dinámica del comportamiento humano bajo una condición de emergencia, con el fin de anticiparse ante los posibles escenarios en una evacuación, permitiendo lograr mejores tasas de eficiencia ante eventuales situaciones de rescate.

En este capítulo se detalla el proyecto de investigación, presentando el planteamiento del problema de investigación, la justificación tanto teórica como práctica del proyecto, los objetivos y la metodología empleada.

1.1 Planteamiento del Problema de Investigación

Aproximadamente 5,8 millones de personas mueren cada año debido a lesiones, lo cual representa un 10% de las muertes en el mundo (World Health Organization, 2010). Este porcentaje es un 32% más que el número de víctimas mortales a causa de enfermedades como la malaria, la tuberculosis y el VIH/SIDA combinados. Con relación al número de personas que mueren por lesiones cada año, aproximadamente el 21% se deben a diversas causas como desastres naturales, asfixia, sofocación, ahogo mecánico, mordeduras de animales, hipotermia e hipertermia (World Health Organization, 2010).

Aunque frecuentemente no se presenten situaciones de emergencia que conlleven a una evacuación de un recinto; cuando estos eventos suceden, pueden generar una gran cantidad de víctimas mortales y lesiones que ponen en riesgo la vida de las personas. De acuerdo con la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (2015), el terremoto de Haití del 2010, con magnitud de 7,0 en la escala de Richter, cobró más de 222.570 víctimas mortales, 300.572 heridos y más de 2,3 millones de personas desplazadas. Adicionalmente, el 16 de abril de 2016 se presentó en Ecuador un movimiento sísmico de magnitud 7,8 que generó un total de 660 personas fallecidas, 28.911 personas albergadas y 7.633 familias albergadas (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016).

En el 2010, en uno de los mayores festivales de música electrónica en Berlín “Love Parade”, en el cual se concentraron 1,4 millones de personas aproximadamente, se presentó una estampida humana en uno de los túneles. El suceso generó 21 víctimas mortales y 500 heridos debido a la presión de la multitud y a la ausencia de salidas de emergencia en el túnel, lo cual implicó que las personas optaran por tratar de salir del lugar de manera riesgosa (Helbing & Mukerji, 2012).

En diversas celebraciones religiosas se han registrado una gran cantidad de muertos y heridos cuando se presentan eventos imprevistos. En una celebración de fin de año en Kerala, India, a la cual asistieron más de diez mil personas, se generó una explosión a causa de una chispa que cayó sobre un edificio que almacenaba fuegos artificiales, ocasionando más de 105 víctimas mortales y 350 heridos (BBC MUNDO, 2016). Durante la peregrinación de 2015 en la que participan millones de musulmanes, una estampida

registrada a las afueras de La Meca generó al menos 717 muertes y 863 personas heridas. Existe un historial de incidentes mortales de diversas magnitudes en La Meca, lo que ha conllevado a las autoridades sauditas a invertir en infraestructura y transporte en el área para evitar estas tragedias (BBC MUNDO, 2015).

En Colombia, el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (2015) reconoce que el 3,74% del total de los casos de muertes accidentales en el país se atribuyen a desastres naturales, desastres no naturales o accidentes masivos (ver Tabla 1-1). Para el caso de las lesiones accidentales, los desastres naturales y accidentes masivos representan el 1,89% del total de casos en el país (ver Tabla 1-2).

Tabla 1-1: Muertes accidentales según circunstancia del hecho en Colombia, 2014

Circunstancia del hecho	Total	
	Casos	%
Autolesión involuntaria	677	46,12
Accidente de trabajo	351	23,91
Desastre natural	46	3,13
Agresión por animales	19	1,29
Desastre no natural o accidente masivo	9	0,61
Embriaguez (Alcohólica y no alcohólica)	6	0,41
Malas condiciones climáticas	2	0,14
Otras circunstancias no específicas	358	24,39
Total	1.468	100

Nota Fuente: Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (Colombia). (2015). *Forensis 2014: datos para la vida*. Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses.

Tabla 1-2: Lesiones accidentales según circunstancia del hecho en Colombia, 2014

Circunstancia del hecho	Total	
	Casos	%
Agresión por animales	1.039	15,77
Accidente de trabajo	775	11,76
Embriaguez (Alcohólica y no alcohólica)	280	4,25
Desastre no natural o accidente masivo	97	1,47
Autolesión involuntaria	70	1,06
Desastre natural	28	0,42
Otro	4.301	65,27
Total	6.500	100

Nota Fuente: Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (Colombia). (2015). *Forensis 2014: datos para la vida*. Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses.

Por otro lado, los planes de evacuación permiten identificar las salidas de emergencia y las rutas de evacuación hasta llegar a un punto de encuentro en una zona segura. A pesar de esto, dichos planes de evacuación carecen de información y entregan al usuario una ruta de evacuación estática, ya que no se consideran características de la evacuación que pueden cambiar en el tiempo, conllevando a que la elección de ruta pueda variar dependiendo de diversos factores del entorno y de la persona.

Debido a que existen aspectos que no son considerados al momento de diseñar planes de evacuación, se identifica la necesidad de investigar qué condiciones se deben incluir en estos planes de contingencia con el fin de preservar la vida de las personas en situaciones de riesgo.

Teniendo en cuenta los planes de evacuación actuales, la magnitud de estos incidentes y el impacto que tiene la cantidad de muertos y heridos por estas causas en la sociedad, se desea conocer:

¿Cómo mediante la modelación del comportamiento de las personas en edificaciones multiniveles se pueden obtener planes de evacuación más eficientes en comparación con los planes convencionales?

1.2 Justificación

Los planes de evacuación permiten establecer acciones oportunas y adecuadas ante situaciones de emergencia, guiando a las personas a evacuar de manera ordenada, rápida y segura. El plan de evacuación debe diseñarse de tal manera que contenga información básica, concreta y clara de lo que el usuario debe hacer, identificando su ruta de evacuación y los puntos de encuentro existentes. Por tanto, en esta sección se describe la justificación teórica y práctica de diseñar modelos de evacuación que permitan analizar el proceso de toma de decisiones de los peatones, considerando el comportamiento reactivo, proactivo y social de las personas.

1.2.1 Teórica

Los planes de evacuación tradicionales son diseñados de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 1700 de higiene y seguridad, medidas de seguridad en edificaciones y medios de evacuación. Esta norma establece los requisitos mínimos que se deben cumplir ante una evacuación en una edificación, facilitando la salida de las personas en caso de emergencia (ICONTEC, 2004).

Las salidas deben estar visibles y señalizadas para que todas las personas puedan encontrar rápido las posibles rutas de evacuación y su respectiva dirección de escape desde cualquier punto de la edificación. Con relación a la señalización, la norma NTC 1461 detalla los tipos de señales de seguridad que se deben utilizar y su respectivo propósito (ICONTEC., 2004).

Estos planes de evacuación entregan una única salida de emergencia sin considerar la existencia de otras rutas de evacuación que pueden ser igualmente seleccionadas, dependiendo de diversos aspectos del entorno y de la persona, los cuales varían a lo largo del tiempo. Por tanto, en esta investigación se diseñó un plan de evacuación que integró aspectos del comportamiento de la persona para la toma de decisiones, considerando a su vez características del entorno. El diseño de un plan de evacuación más flexible se

obtuvo por medio de la modelación de una evacuación en un espacio cerrado conociendo las características de las personas y la estructura real de una edificación.

Los modelos macroscópicos se fundamentan en la semejanza entre el movimiento de los peatones y el movimiento de gases y fluidos (Galvis & González, 2009). Estos modelos describen el flujo de personas con ecuaciones diferenciales, lo que hace que en la mayoría de los casos no exista una solución analítica, y sea el primer inconveniente de modelación (Sagun, Bouchlaghem, & Anumba, 2011). Adicionalmente, en este método resulta difícil incorporar reglas complejas de comportamiento y la heterogeneidad de los peatones.

Modelar el comportamiento de un gran número de individuos es una tarea compleja, no sólo por el total de personas sino por sus interacciones, movimientos y comportamientos heterogéneos. Para esto se requiere representar la dinámica local de toma de decisiones de cada uno de los peatones, la cual puede estar afectada por diversos factores psicológicos, fisiológicos, de comportamiento colectivo, sociales y/o del entorno. Una alternativa para representar la dinámica de los individuos y sus interacciones entre ellos mismos y con el entorno, son los modelos microscópicos de simulación.

Casburn et al. (2007) clasifican los modelos de microsimulación en tres categorías: modelos de fuerza social, modelos de autómatas celulares y modelos basados en agentes. Los modelos de fuerza social predicen el comportamiento de grandes multitudes de una manera continua y eficiente pues representan el movimiento de los peatones como una superposición de fuerzas que reflejan las influencias del entorno (Galvis & González, 2009; Helbing & Molnar, 1995). Los movimientos de los peatones se determinan por efectos de llegar a un determinado destino, de mantener una cierta distancia entre ellos y los obstáculos, y de sentirse atraído por otras personas u objetos (Xiaoping, Tingkuan, & Mengting, 2009). Sin embargo, una de las desventajas de estos modelos es que requieren que los parámetros iniciales del sistema sean configurados cuidadosamente en cada una de las instancias de simulación (Casburn et al., 2007). Adicionalmente, en estos modelos es complicado añadir reglas complejas de comportamiento e incorporar el comportamiento heterogéneo de cada individuo (Galvis & González, 2009).

Los modelos de autómatas celulares (AC) se caracterizan por discretizar el espacio y el tiempo (Lightfoot & Milne, 2003). El espacio es representado por una grilla compuesta por

celdas, donde el estado de la celda se actualiza en cada iteración según un conjunto simple de reglas que se aplican a partir de su estado inmediatamente anterior y el de sus celdas adyacentes (Galvis & González, 2009). Una desventaja de este enfoque es que puede llevar a representaciones poco realistas, dado que el espacio y el movimiento son discretos y la cantidad de estados de las celdas es muy limitado (Casburn et al., 2007). Adicionalmente, presenta el mismo inconveniente de los modelos de fuerza social, en los cuales se hace difícil la incorporación de la naturaleza heterogénea de una gran cantidad de personas.

Los modelos basados en agentes han sido utilizados para simular la evacuación por su capacidad de representar el componente heterogéneo entre los agentes (Tan, Wu, & Lin, 2015). Estos modelos permiten incorporar reglas de comportamiento complejas, realizar seguimiento a las distintas acciones de los agentes durante la simulación y agregar múltiples instancias de peatones (Galvis & González, 2009). Además, este enfoque cuenta con agentes autónomos que interactúan entre ellos mismos y con el entorno, lo cual permite evaluar un comportamiento emergente del grupo (Wagner & Agrawal, 2014).

En esta investigación, el modelo de simulación se desarrolló mediante el enfoque basado en agentes, dado que permite recrear de manera cercana el comportamiento dinámico y heterogéneo de las personas en una edificación.

1.2.2 Práctica

En edificaciones, los simulacros tienen como objetivo medir la capacidad de respuesta y la reacción de las personas ante una situación de peligro de posible ocurrencia, en un lugar y en tiempo real. Adicionalmente, buscan que las personas reconozcan las diversas rutas seguras de escape y se familiaricen a evacuar ante un evento inesperado. Por medio de este ejercicio, se identifican errores o falencias en el plan de evacuación y la manera inadecuada de enfrentar un suceso riesgoso.

En los simulacros se pueden obtener datos e información con relación a los tiempos de reacción de las personas, los diversos comportamientos o conductas presentadas, el tiempo total de evacuación del recinto, entre otros. No obstante, los simulacros presentan una desventaja considerable pues no logran alterar o perturbar los patrones de

comportamiento de las personas, ya que en realidad la evacuación no cuenta con la presencia de una emergencia real y los participantes conocen de antemano que están en un simulacro. Esto conlleva a que los datos obtenidos carezcan de precisión y sean poco confiables (Galvis & González, 2009).

Para resolver este limitante, se hace necesario realizar una representación más cercana a la realidad, adicionando el componente de peligro, evidenciando pánico y conductas imprevistas en las personas. La simulación permite recrear diversas condiciones que se pueden presentar en un evento de emergencia real. Por medio de esta, se obtienen datos e información más exactos, y constituyen una herramienta para la toma de decisiones respecto a políticas de evacuación aplicables y eficientes (Galvis & González, 2009).

A partir de un análisis riguroso de los comportamientos y conductas de los ocupantes, se propone el desarrollo de un modelo microscópico de simulación de evacuación que emule una situación real de peligro, y de esta manera tener insumos para el diseño de planes de evacuación que permitan trasladar a los ocupantes a zonas seguras, disminuyendo el número de víctimas y sus tiempos de evacuación.

1.3 Objetivos

A continuación se presentan el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación:

1.3.1 General

Diseñar planes de evacuación ante emergencias considerando el comportamiento dinámico de peatones, minimizando el efecto en el número esperado de personas afectadas y el tiempo de evacuación.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar el comportamiento de peatones en escenarios de evacuación ante emergencias.
- Diseñar y calibrar un modelo de simulación de evacuación ante emergencias.
- Evaluar la sensibilidad de las variables que influyen los tiempos de evacuación y el comportamiento de peatones ante situaciones de emergencia.

1.4 Metodología Propuesta

El desarrollo de la presente investigación se detallará por fases como se describe a continuación:

- **Fase 1: Identificación de las Características del Modelo Propuesto**

Se realizó una revisión del estado del arte del problema de evacuación ante emergencias, identificando los objetivos de las investigaciones, los entornos de simulación considerados, los casos de estudio aplicados, los enfoques de modelación como método de solución, las métricas de evaluación de desempeño y los factores que influyen en una evacuación y/o en el comportamiento de multitudes. Esto es aplicado con la finalidad de identificar brechas en la literatura hasta la fecha.

- **Fase 2: Diseño del Modelo de Simulación**

En esta fase se identificaron las variables más representativas del comportamiento de las personas ante situaciones de emergencia y las métricas para cuantificar el desempeño del modelo. Se diseñó el modelo de simulación considerando las variables ya identificadas. Luego, se calibró el modelo usando los datos obtenidos de un simulacro que se desarrolló en un salón magistral de la Universidad del Norte, con dos posibles rutas de evacuación.

- **Fase 3: Caso de Estudio Aplicado usando el Modelo Planteado**

Con base al modelo calibrado, se prosiguió a evaluar una aplicación real de una evacuación en edificios multiniveles con una gran cantidad de personas. El edificio Julio Muvdi de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia) fue escogido como caso de estudio para la investigación, con el objetivo de analizar la conexión de cada piso con las escaleras y las rampas. Finalmente, se adaptó el modelo propuesto al caso de estudio elegido y se obtuvieron los respectivos resultados.

- **Fase 4: Diseño del Plan de Evacuación**

Se realizó un análisis de sensibilidad y se modificó el modelo existente con el fin de diseñar un plan de evacuación flexible que considere un cambio en la elección de ruta y obtener así mejores resultados en cuanto a tiempo de evacuación y número de personas afectadas. Los resultados se compararon con el modelo de evacuación obtenido en la Fase 3.

2. Marco Teórico y Estado del Arte

En estas últimas décadas, se ha tenido un importante interés en representar situaciones cotidianas y de emergencia en la dinámica local de toma de decisiones y flujo de peatones. Por tanto, en este capítulo se inicia detallando las posibles reglas de decisión para el movimiento de peatones, los factores que afectan el comportamiento de las personas y los modelos de evacuación existentes en la literatura. Seguidamente se presenta una revisión del estado del arte relacionada con los enfoques microscópicos de simulación. Estas investigaciones buscan representar evacuaciones, recreando el movimiento de peatones y sus interacciones entre ellos mismos y con el entorno. Luego se presenta el análisis de resultados con el fin de identificar brechas en la literatura hasta la fecha y las variables más representativas del comportamiento de las personas ante situaciones de peligro.

2.1 Reglas de decisión para el movimiento de peatones

Existen dos tipos de reglas de decisión para el movimiento de agentes: la vecindad de Von Neumann y la vecindad de Moore. La vecindad de Von Neumann es uno de los dos tipos más comunes, donde los peatones tienen 4 posibles direcciones de movimiento (Perez, Tapang, Lim, & Saloma, 2002). La Figura 2-1 presenta las celdas que se pueden seleccionar como nueva posición de acuerdo a este criterio de movimiento.

Figura 2-1: Direcciones de movimiento según Von Neumann Neighborhood

	$(i, j + 1)$	
$(i - 1, j)$	(i, j)	$(i + 1, j)$
	$(i, j - 1)$	

Nota Fuente: Perez, G. J., Tapang, G., Lim, M., & Saloma, C. (2002). Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(3), 609-618.

Por otro lado, la vecindad Moore es el otro tipo de desplazamiento que pueden realizar los peatones. En esta vecindad, las personas pueden moverse en 8 posibles direcciones y llegar a una celda adyacente vacía en un solo paso (Y. Yang, Deng, Xie, & Jiang, 2014). En la Figura 2-2 se ilustra las posibles direcciones de movimiento desde la celda central, la cual también debe considerarse como posible opción en caso que no se encuentren celdas vacías.

Figura 2-2: Direcciones de movimiento según Moore Neighborhood

$(i - 1, j + 1)$	$(i, j + 1)$	$(i + 1, j + 1)$
$(i - 1, j)$	(i, j)	$(i + 1, j)$
$(i - 1, j - 1)$	$(i, j - 1)$	$(i + 1, j - 1)$

Nota Fuente: Fu, L., Luo, J., Deng, M., Kong, L., & Kuang, H. (2012). Simulation of evacuation processes in a large classroom using an improved cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Procedia engineering*, 31, 1066-1071.

Para la selección de la dirección, cada celda puede estar vacía u ocupada por un obstáculo o peatón. Por tanto, se debe considerar cual es el objetivo de direccionamiento del peatón, analizando las celdas disponibles que se pueden elegir. Esta decisión depende del criterio de selección de la persona y de su objetivo local, la distancia de la nueva posible posición a la puerta (Georgoudas, Sirakoulis, & Andreadis, 2006), la densidad de las personas en una salida específica (Y. Yang et al., 2014), entre otros, se pueden considerar como posibles criterios para la selección de una dirección.

2.2 Posibles factores que influyen el comportamiento de peatones

Los siguientes factores pueden alterar los patrones de comportamiento de las personas en situaciones de emergencia.

- **Edad**

La edad es un factor que puede impactar la conducta y la reacción de los peatones. Los niños y adultos mayores pueden tener una capacidad de ubicación e identificación de espacios menor que la de personas jóvenes o de edad intermedia (Aubrey & Dobbs, 1990).

Además, desde una perspectiva de supervivencia, los niños deben ser diferenciados de los adultos debido a su desarrollo neurológico y cognitivo (Leach, 2004). Por tal motivo, el adulto mayor y los niños cuentan con una diferencia en la interpretación de eventos de peligro.

- **Género**

El género puede influenciar en la conducta de los peatones ante emergencias. Los hombres y mujeres difieren en el reconocimiento espacial con relación a la distancia y dirección, diferenciándose en el manejo espacial del lugar y cómo se comportan de acuerdo a su percepción y aprendizaje del espacio (Montello, Lovelace, Golledge, & Self, 1999). La visualización dentro de un espacio determinado favorece más a los hombres que a las mujeres, lo que hace que estos aprovechen e identifiquen los espacios disponibles a evacuar (Rizk-Jackson et al., 2006).

Además, otro aspecto que depende del género es la capacidad de memorización, la cual favorece a las mujeres. Estas diferencias se pueden relacionar con la búsqueda de estrategias y el procesamiento de información espacial (Rizk-Jackson et al., 2006).

- **Nivel de Pánico**

La propagación del pánico en las personas puede generar alteraciones en su conducta y en las condiciones de la evacuación. Una persona se comporta completamente diferente en situaciones normales que en una situación donde su vida se encuentra en peligro, ya que puede entrar en pánico y propagarlo a las demás personas. Se puede presentar que una persona vea una multitud corriendo en dirección hacia donde ella se encuentra, generando que esta corra en el mismo sentido lo cual puede conllevar a estampidas humanas, generando más víctimas de lo que la misma emergencia podría tener como resultado (Galvis & González, 2009).

El pánico puede generar que una persona con un alto conocimiento del lugar pierda su sentido de orientación, debido a la confusión. Adicionalmente, un alto nivel de pánico podría generar comportamientos agresivos o inesperados a fin de poder salir más rápido del lugar sin pensar en las otras personas.

- **Nivel de conocimiento del lugar**

Este factor hace referencia al conocimiento del lugar o a la familiaridad que se tiene del sitio, ya que es una ventaja fundamental para la realización de una evacuación rápida y efectiva. Una persona que no conozca el lugar, no cuenta con las herramientas para identificar rutas más rápidas para evacuar. A pesar de esto, como se mencionó en el factor de pánico, una persona que conoce el lugar se puede confundir por la misma angustia, afectando su ubicación espacial.

Es importante identificar la diferencia de una persona que conoce todo el lugar, que una persona que pasa siempre por un lugar específico. El primer tipo de persona puede identificar rutas alternas que pueden estar habilitadas para evacuar. Pero por otro lado, el segundo tipo de persona saldría por el camino o la ruta que conoce. En el caso que la ruta este deshabilitada, la persona no conocería cual debería ser el camino a escoger.

A pesar que se reconoce que los anteriores factores son importantes en la evaluación del comportamiento de los peatones en situaciones de emergencia, pueden no ser los únicos. Resulta entonces relevante conocer cuáles son los factores que afectan en mayor medida el comportamiento de las personas, y como estos pueden impactar el tiempo de evacuación de una multitud en una situación de desastre, siendo necesaria mayor investigación en el tema.

2.3 Modelos de simulación de evacuaciones

A continuación se presenta la estructura de clasificación de los modelos de evacuación de acuerdo al propósito por el cual fueron diseñados (Shen & Chien, 2004).

2.3.1 Modelos de optimización

En este tipo de modelos, los individuos son tratados como objetos no pensantes que reaccionan automáticamente a un estímulo externo, evacuan eficientemente y son considerados entes homogéneos (Steve Gwynne, Galea, Owen, Lawrence, & Filippidis, 1999). Los modelos de TAKAHASHI (Takahashi, Tanaka, & Kose, 1989) y EVACNET4 (Kisko & Francis, 1985) se encuentran dentro de esta clasificación, en donde el entorno o la configuración del lugar es representado por medio de arcos y nodos. Este método es

simple, requiere menos tiempo de corrida, y su dificultad radica en trazar el movimiento individual en la simulación (Shen & Chien, 2004).

2.3.2 Modelos de simulación

Estos modelos representan el comportamiento y el flujo de peatones, analizando las preferencias para la selección de rutas y los tiempos de reacción en una evacuación. BGRAF simula procesos cognitivos en una evacuación en la cual se prueban diferentes hipótesis sobre el comportamiento humano ante emergencias (Ozel, 1992). EXODUS es un modelo basado en agentes que analiza las condiciones del lugar considerando al peatón como un agente activo, el cual responde ante una emergencia por incendio con un gran número de personas a evacuar (Galea, Owen, & Lawrence, 1996; Owen, Galea, & Lawrence, 1997; Owen, Galea, & Lawrence, 1996).

EXIT89 y PAXPORT reconocen a un grupo homogéneo y sin el efecto del individuo, adoptando de esta manera una perspectiva global de la emergencia (Barton & Leather, 1995; Steve Gwynne et al., 1999). Estos modelos computacionales representan la evacuación con relación al número de personas evacuadas y no identifican el comportamiento individual de las personas. EGRESS, E-SCAPE y VEGAS son modelos que se desarrollaron para evaluar el proceso de toma de decisiones de las personas ante una evacuación, considerando la perspectiva del individuo (Ketchell, Bamford, & Kandola, 1995; Ketchell et al., 1993; Reisser-Weston, 1996; Still, 1993) .

EVACSIM analiza sistemas basados en reglas de comportamiento estocástico, prediciendo el movimiento del individuo e identificando eventos críticos durante un evento de emergencia (L. Poon, 1985; L. S. Poon, 1994; Shen & Chien, 2004). EXITT fue creado para la simulación de eventos discretos, prediciendo la reacción de las personas a través de técnicas de programación lineal (Levin, 1989; Shen & Chien, 2004). Estos sistemas basados en reglas de comportamiento presentan una desventaja relacionada al proceso de toma de decisiones, donde los peatones reaccionan de la misma manera bajo las mismas circunstancias, limitando la posibilidad de una variación natural en el comportamiento del individuo (Steve Gwynne et al., 1999).

MAGNETMODEL es otro tipo de modelo de evacuación que evalúa al peatón, empleando un sistema de comportamiento que se relaciona a una ecuación o conjunto de ecuaciones para la población en general. Este método no necesariamente describe el comportamiento real de una persona ante emergencias, sino que asume un comportamiento análogo tomado de otro campo de estudio (Steve Gwynne et al., 1999; Okazaki & Matsushita, 1993).

SIMULEX es un modelo basado en agentes que considera al individuo con un comportamiento implícito, representándolo a través de métodos físicos e incorporando factores psicológicos y sociológicos (Steve Gwynne et al., 1999). Se enfoca en aspectos físicos de la persona y el efecto que tienen en el tiempo de evacuación. A pesar de esto, SIMULEX no modela aspectos psicológicos complejos como la comunicación entre los ocupantes, la familiaridad en las rutas de evacuación, y el efecto del pánico en las personas (P. Thompson, Wu, & Marchant, 1997; P. A. Thompson & Marchant, 1995a).

2.3.3 Evaluación de riesgos

En esta categoría los modelos buscan cuantificar el riesgo ejecutando un gran número de corridas con variaciones estadísticamente relacionadas al diseño e implementación de elementos de protección contra incendios. Los modelos CRISPII y WAYOUT pertenecen a este tipo de modelos, los cuales tienen como objetivo predecir un comportamiento emergente ante diferentes condiciones de riesgo (Fraser-Mitchell, 1994, 1996; Shestopal & Grubits, 1994).

2.4 Enfoques de modelación

Considerando la literatura disponible donde se analizan situaciones de evacuación, se presenta una clasificación taxonómica de acuerdo al enfoque de modelación empleado. En este trabajo se presentan 86 artículos relacionados directamente con la dinámica de comportamiento de peatones y como la configuración del entorno afecta las condiciones de una evacuación. Cada enfoque incluye una subdivisión de los estudios teniendo en cuenta el objetivo de la investigación, el entorno de simulación, el caso de estudio, la métrica de evaluación y los factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes.

Con respecto a su modelación, existen cuatro enfoques encontrados en la literatura: de fuerza social, autómata celular, teoría de juegos y basado en agentes.

2.4.1 Modelos de fuerza social

Helbing & Molnar (1995) fueron los primeros en proponer un modelo de fuerza social para el movimiento de peatones. Cada persona tiene un objetivo, el cual es el punto hacia donde se mueven y donde efectos de repulsión, atracción y deseo impactan la motivación individual de cada agente (Gutierrez-Milla, Borges, Suppi, & Luque, 2015).

Este enfoque de modelación fue empleado para simular situaciones de pánico, describiendo los diferentes comportamientos de la multitud a través de fuerzas socio-psicológicas y físicas (Helbing, Farkas, & Vicsek, 2000; Parisi & Dorso, 2005). Los modelos de fuerza social buscan analizar la transición entre el comportamiento de multitudes en situaciones normales y condiciones de emergencia (Helbing, Farkas, Molnar, & Vicsek, 2002), donde la alteración por el pánico influye en la velocidad deseada y causa efectos conocidos como “*freezing by heating*” y “*faster is slower*” (ver Anexo 1).

2.4.2 Modelos de autómata celular

Autómatas celulares (AC) es un paradigma de modelación dinámico de sistemas espaciales propuesto por Ulam y von Neumann (1966). Un AC consiste en una cadena de células con k estados finitos posibles, la cual se puede actualizar en un tiempo discreto con una regla de interacción idéntica local (Pelechano & Malkawi, 2008). El estado de la célula se modifica dependiendo su situación actual y el estado de las células vecinas. La interacción entre los ocupantes fue analizada usando el modelo EXODUS, recreando una evacuación de una edificación a causa de una emergencia por incendio (S Gwynne, Galea, Lawrence, & Filippidis, 2001).

Daoliang, Lizhong y Jian (2006) y Pérez, Tapang, Lim y Saloma (2002) analizaron la dinámica de salida de los peatones que se encuentran ubicados en un cuarto, donde las personas se pueden desplazar de acuerdo con el vecindario de Von Neumann. Lightfoot y Milne (2003) y Yuan y Tan (2007) presentaron un modelo de movimiento de peatones en una edificación considerando el fenómeno de estructuras de grupo. Abdelghany, Abdelghany, Mahmassani y Al-Gadhi (2005) propusieron un modelo de AC que simula el

proceso de movimiento de las personas en diferentes secciones de La Meca, analizando lugares con una interacción compleja y una alta congestión de peatones (ver Anexo 2).

2.4.3 Modelos de teoría de juegos

Teoría de juegos es otra herramienta de modelación que se ha utilizado para simular la dinámica de peatones. Se basa en el comportamiento de personas en situaciones estratégicas en donde el éxito en la toma de decisiones de un jugador depende de las decisiones de los demás jugadores (Fudenberg & Tirole, 1991). Cada juego se caracteriza por una matriz de pagos que puede recibir cada jugador de acuerdo al curso de acción seleccionado por todos los agentes. Su principal ventaja radica en su utilidad para representar situaciones complejas de comportamiento. Su desventaja se encuentra asociada a la dificultad de identificar una matriz de pagos apropiada debido a la gran cantidad de jugadores (Galvis & González, 2009). Lo et al. (2006) establecieron el enfoque basado en juegos no cooperativos para modelar las estrategias de los jugadores teniendo en cuenta sus propios intereses ante una evacuación por incendio. Para más detalle, ver Anexo 3.

2.4.4 Modelos basados en agentes

Los modelos de simulación multiagente comenzaron a ganar popularidad en los años 90 y representan una desviación a la simulación clásica. Un ejemplo de este tipo de modelos es el paradigma de simulación de eventos discretos (Heath, Hill, & Ciarallo, 2009). Bierlaire, Antonini y Weber (2003) diseñaron una herramienta de simulación de peatones, modelando el comportamiento del individuo, el cual es influenciado por factores como la velocidad, la edad y la presencia de líderes y obstáculos.

La capacidad de este enfoque para poder simular sistemas complejos ha permitido su aplicabilidad en campos que van desde la ingeniería hasta las matemáticas, las ciencias sociales y la economía. Los agentes cuentan con aspectos reactivos ante los cambios del entorno, proactivos para alcanzar sus objetivos y con comportamiento social al interactuar con otros agentes. Por tanto, la dinámica emergente conlleva a que no sea un enfoque de intuición y predicción por experiencia o sentido común (Camillen et al., 2009).

Galvis y González (2009) desarrollaron un modelo de movilidad de personas en espacios cerrados en situaciones de emergencia, donde factores como el género, el nivel de conocimiento del lugar y el nivel de compañía influyen en las condiciones de una evacuación. Qiu & Hu (2010) y Vizzari et al. (2015) analizaron el fenómeno de estructuras de grupo, el cual fue incorporado a un sistema de simulación de multitudes basado en agentes. Otros autores investigaron como la presencia de grupos con diferencias culturales influye en la dinámica emergente en La Meca (Bandini, Rubagotti, Vizzari, & Shimura, 2011).

Gutierrez-Milla, Borges, Suppi y Luque (2014) analizaron eventos de evacuación en un entorno de 3.000, 6.000, 9.000, 12.000 y 15.000 personas, usando NetLogo como lenguaje de programación basado en agentes. Los autores recrearon un caso real en una edificación en Barcelona y calcularon el número de réplicas que se deben realizar para obtener resultados estadísticamente significativos. Bernardini, D'Orazio, Quagliarini y Spalazzi (2014) evaluaron los riesgos sísmicos por medio de un modelo multiagente. Se consideró para este estudio el comportamiento humano, simulando el movimiento de peatones basado en el análisis de cintas de video.

Tan, Wu y Lin (2015) emplearon un modelo de agentes para simular el comportamiento de las personas para la selección de rutas al momento de salir de eventos al aire libre. En esta investigación, la influencia del conocimiento espacial y las preferencias por diferentes estrategias de enrutamiento fueron analizadas, presentando un modelo de comportamiento cognitivo de evacuación que se centra en las diferencias individuales dependiendo de la edad y el género de cada persona (ver Anexo 4).

2.4.5 Modelos híbridos

Dijkstra et al. (2000), Dijkstra et al. (2001) y Ben et al. (2013) describieron un enfoque de AC multiagente para analizar si las decisiones en el proceso de diseño y planeación en una edificación pueden verse afectadas por el comportamiento de los peatones. Por su parte, Sarmady, Haron y Talib (2008) modelaron el proceso de movimiento humano usando ese mismo enfoque, simulando el comportamiento de la multitud en diferentes secciones de la mezquita en la Meca.

Pelechano, O'Brien, Silverman y Badler (2005) integraron un modelo psicológico de fuerza social multiagente en una simulación de multitudes. La comunicación entre agentes y el desempeño de roles fueron adicionados para recrear de una manera realista las condiciones del entorno. Adicionalmente, factores como el nivel de pánico, el nivel de familiaridad y la psicología de desastres fueron considerados para representar el comportamiento de los peatones.

Asimismo, un modelo basado en agentes y de fuerza social se realizó con el apoyo de la dinámica de grupos y la identificación de patrones de personalidad de los peatones, tales como físicos y/o psicológicos (Kountouriotis, Thomopoulos, & Papelis, 2014). De igual manera, esta combinación de modelos de fuerza social multiagente también fue usada para estudiar cómo el tamaño de la puerta de salida y la velocidad deseada afectan el tiempo de evacuación (Ha & Lykotrafitis, 2012). Además, se presentaron diferentes casos de configuración de una edificación, variando el número de cuartos y el número de niveles con los que cuenta el edificio.

Tissera, Printista y Luque (2012) y Tissera et al. (2013) propusieron un modelo de AC multiagente para representar la propagación del fuego y el comportamiento de las personas en un recinto cerrado. Los autores llevaron a cabo una serie de experimentos con el simulador EVAC, un sistema desarrollado en Java que permite diseñar y simular entornos de simulación. Primero realizaron el modelo con agentes que no se encuentran familiarizados con el entorno, identificando las señales que se activan ante una emergencia. Para el segundo experimento consideraron la presencia de un incendio, analizando el impacto de salidas de emergencia bloqueadas y la propagación de fuego y humo en el lugar (ver Anexo 5).

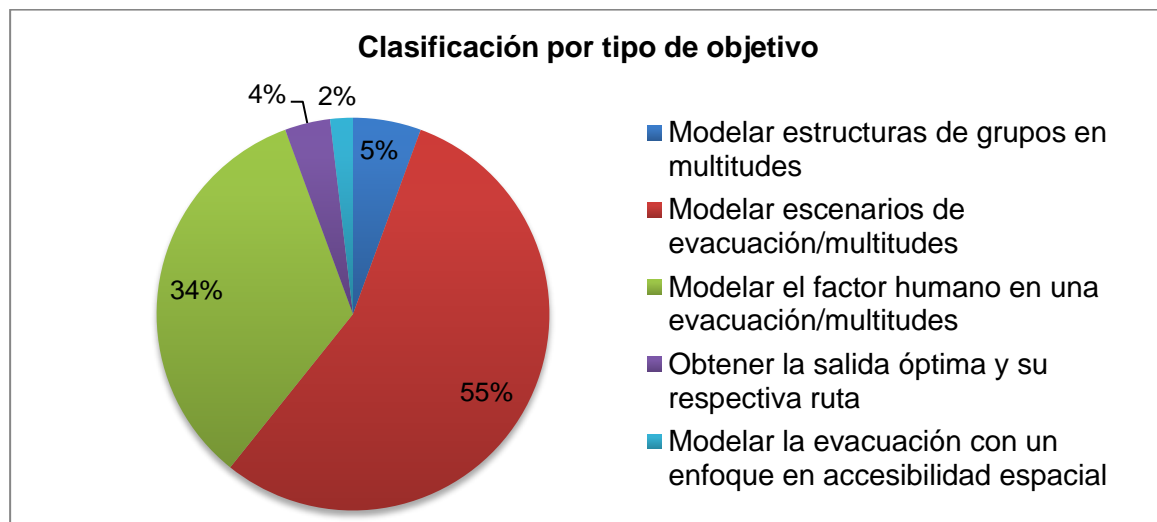
2.5 Desarrollo del estado del arte

A partir de los artículos encontrados en la literatura, se realizó un análisis de cada uno de los componentes identificados de acuerdo al objetivo de la investigación, el entorno de simulación, el caso de estudio, el enfoque de modelación, la métrica de evaluación y los factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes.

2.5.1 Clasificación por tipo de objetivo

El 55% de las publicaciones buscan modelar escenarios de evacuación y/o de multitudes, seguido por un 34% que tiene como objetivo modelar el factor humano o las conductas que tienen los agentes ante estos eventos (ver Figura 2-3). En el porcentaje restante se buscó modelar el fenómeno de estructuras de grupos, la evacuación con un enfoque de accesibilidad y de obtener las salidas y rutas óptimas. Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que hay un interés significativo en la modelación del factor humano y de escenarios normales y/o de emergencia.

Figura 2-3: Clasificación por objetivo de la investigación



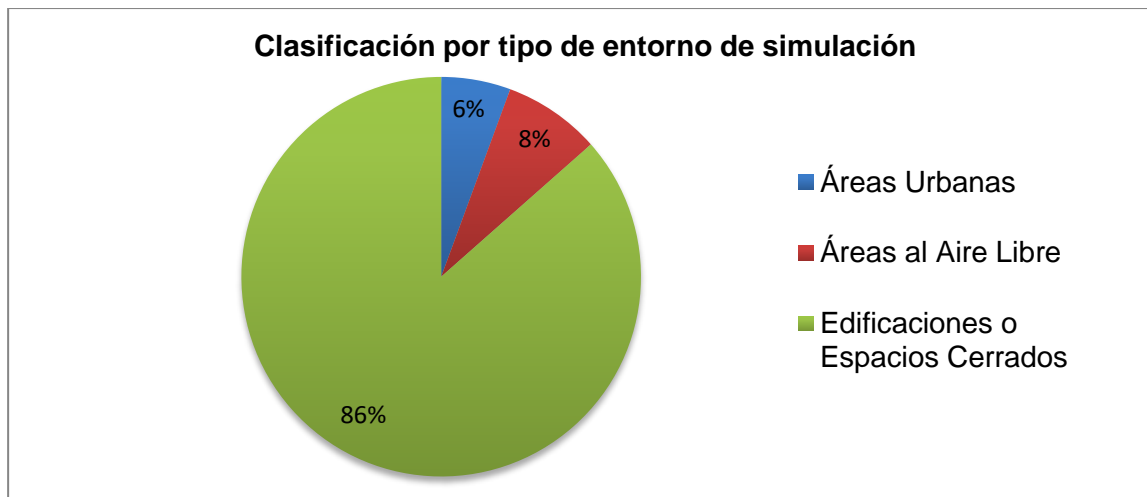
Por otro lado, el 81% de los estudios utilizan un enfoque mono-objetivo y no consideran conjuntamente la modelación de escenarios de evacuación, el factor humano, las salidas óptimas, la accesibilidad espacial, y las decisiones de los grupos en multitudes. En esta investigación, a diferencia de la práctica usual, se busca modelar escenarios de evacuación considerando simultáneamente el comportamiento humano ante emergencias.

2.5.2 Clasificación por tipo de entorno de simulación

Con relación al entorno de simulación, se observa que la mayoría de estudios de flujo de peatones son realizados en edificaciones o espacios cerrados (ver Figura 2-4). A pesar de esto, no se encontraron estudios que consideren tanto un entorno de simulación con una

configuración espacial compleja, como los factores que alteran la conducta de las personas en una emergencia.

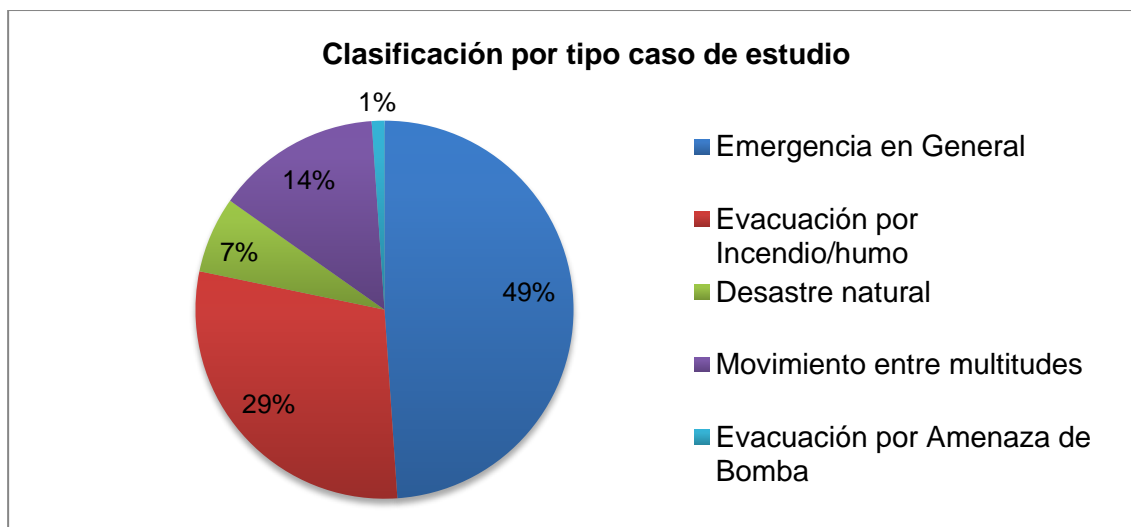
Figura 2-4: Clasificación por tipo de entorno de simulación



2.5.3 Clasificación por caso de estudio

La Figura 2-5 presenta la clasificación por el tipo de caso de estudio aplicado en las publicaciones. El 49% de los artículos hacen referencia a una emergencia en general, pues no especifican que tipo de emergencia es abordada en el estudio. Seguidamente, un 29% son investigaciones que tratan evacuaciones por incendio o humo, mientras que un 14% estudian casos relacionados a movimientos entre multitudes.

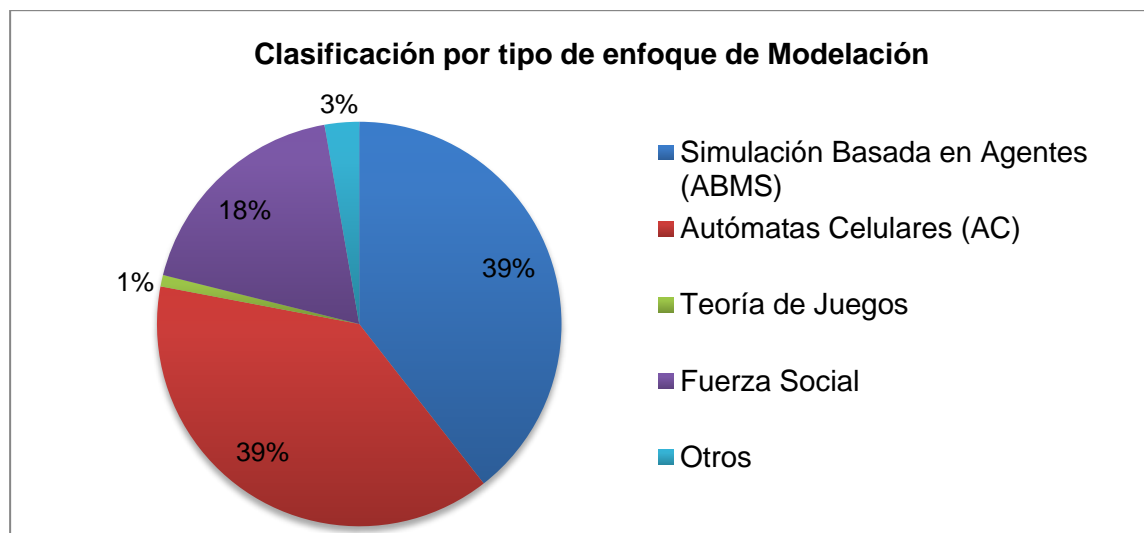
Figura 2-5: Clasificación por tipo de caso de estudio



2.5.4 Clasificación por enfoque de modelación

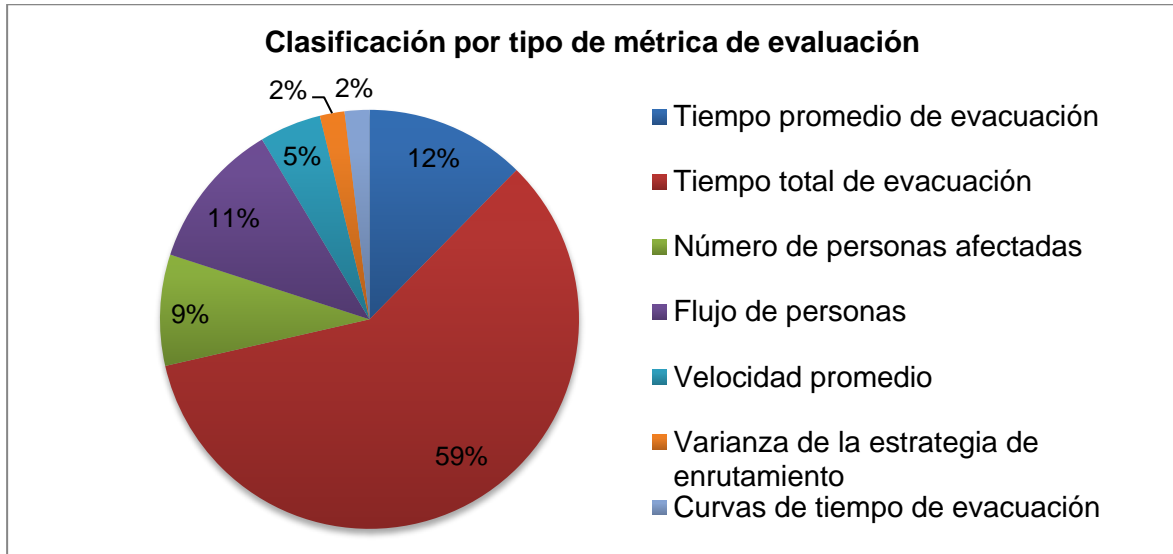
Los modelos basados en agentes y autómatas celulares son los paradigmas más utilizados en los artículos presentados. El 39% de las investigaciones encontradas seleccionó ABMS por su capacidad para representar reglas complejas de comportamiento y el componente heterogéneo entre agentes en situaciones normales o de peligro. El otro 39% utilizó los modelos AC para representar el entorno y/o las personas. Incluso, en algunas ocasiones este enfoque de modelación fue utilizado en conjunto con multiagente. En algunas publicaciones no se especificó el enfoque utilizado, por lo que fueron adicionados a la categoría de otros (ver Figura 2-6).

Figura 2-6: Clasificación por tipo de enfoque de modelación



2.5.5 Clasificación por tipo de métrica de evaluación

En la Figura 2-7 se identifica que el 78% de los estudios emplean una métrica de evaluación relacionada con el tiempo (tiempo promedio de evacuación, tiempo total de evacuación, velocidad promedio y curvas de tiempo de evacuación), mientras que el porcentaje restante utiliza otras métricas como el número de personas afectadas, el flujo de personas o la varianza de la estrategia de enrutamiento.

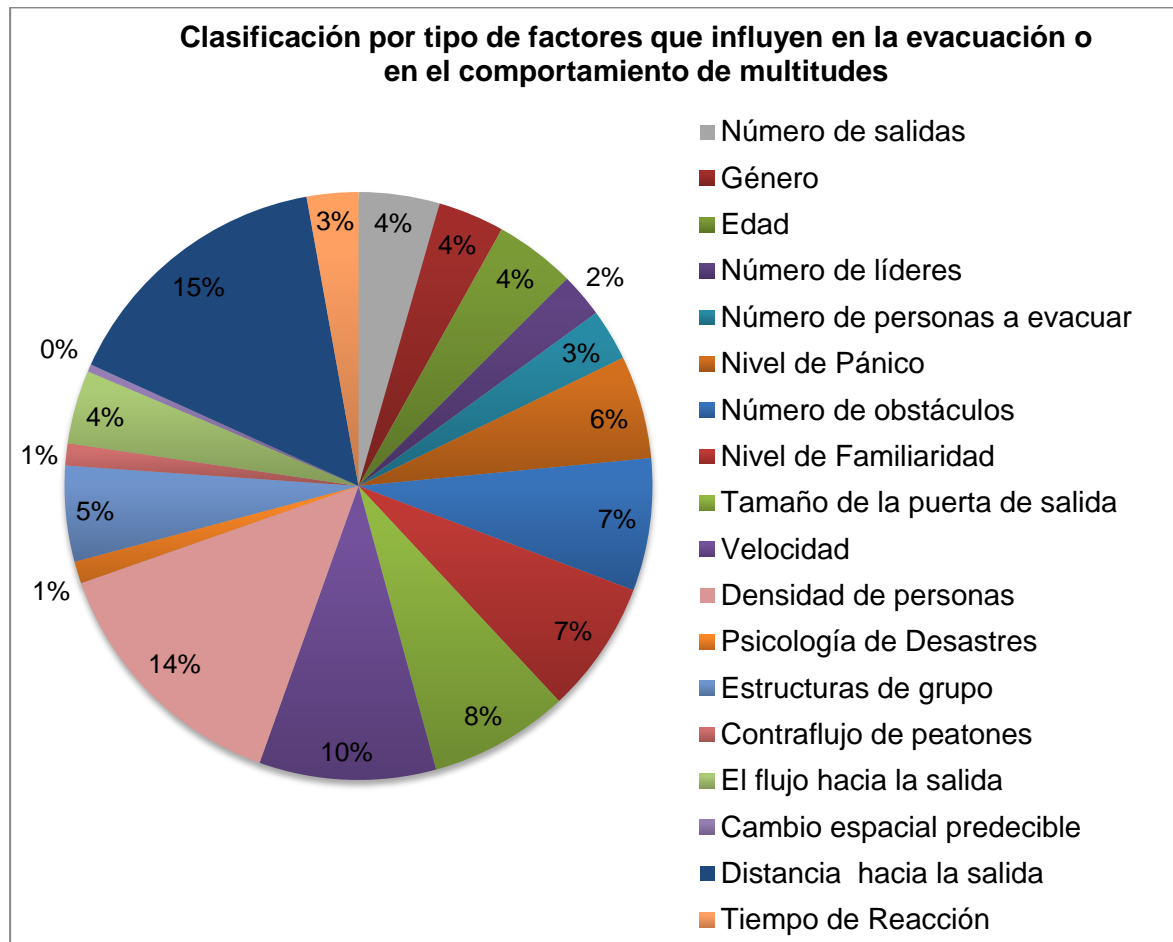
Figura 2-7: Clasificación por tipo de métrica de evaluación

2.5.6 Clasificación por los factores que influyen en una evacuación o en el comportamiento de multitudes

Respecto a los factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes, los diferentes estudios identifican una serie de factores psicológicos, fisiológicos, sociales, de comportamiento colectivo y del entorno (ver Figura 2-8).

Teniendo en cuenta la multiplicidad de factores que pueden influir en el comportamiento de los peatones al encontrarse en situaciones de evacuación, y a la ausencia de investigaciones aplicadas al contexto local; en esta investigación se busca desarrollar un análisis crítico que permita identificar los factores significativos que alteran o perturban los patrones del comportamiento de las personas.

A partir de estos resultados, se prosigue a la etapa de modelación del proceso de salida de los ocupantes en situaciones de emergencia, de manera que se pueda representar la reacción de los agentes y como estas conductas influyen directamente en el desempeño de la evacuación.

Figura 2-8: Clasificación por tipo de factores que influyen en la evacuación

Adicionalmente, a pesar que en las investigaciones encontradas se evidencia un gran interés por la modelación del comportamiento humano, y como las distintas reacciones y capacidades de respuesta de las personas pueden alterar significativamente las condiciones de una evacuación:

- No se han encontrado investigaciones que consideren un entorno de simulación con una configuración espacial compleja, tales como edificaciones con varios niveles. Una investigación presentó varios casos de entornos considerados, los cuales van desde una edificación con un nivel y varios cuartos, hasta varios cuartos y tres niveles (Ha & Lykotrafitis, 2012). A pesar de esto, no consideraron los factores que alteran la conducta de las personas y como estos puede afectar a los peatones en una evacuación.

- No existe múltiples aplicaciones en Colombia que analicen cuales deben ser las rutas seguras dentro de un plan de evacuación eficiente, identificando los factores que impactan en el comportamiento de las personas y en las condiciones de evacuación.

Por otro lado, se ha encontrado que los modelos de microsimulación basado en agentes han sido empleados con éxito para la representación de evacuaciones ante emergencias. Se reconocen sus ventajas para recrear eventos de peligro de una manera más real, así como su capacidad para obtener información y datos más precisos, considerándolo como el enfoque de modelación seleccionado.

Finalmente, la revisión del estado del arte permitió identificar las brechas anteriormente mencionadas con relación al problema de evacuación ante emergencias y dinámica de multitudes. Como consecuencia, esta investigación tiene como propósito el diseño de planes de evacuación basados en simulación microscópica considerando el comportamiento de las personas en edificaciones.

3. Modelo de evacuación ante emergencias

Este capítulo presenta un modelo de evacuación basado en agentes con el fin de modelar el comportamiento de las personas y el proceso de elección de ruta en situaciones de emergencia. Se comenzará con una descripción general de los modelos multiagente y de la plataforma de simulación seleccionada. Seguidamente, se describe un modelo de elección discreta para simular un entorno de simulación con múltiples estrategias de enrutamiento.

Con el objetivo de conocer los factores que influyen en una evacuación y en el comportamiento de las personas, se realizó un simulacro de evacuación en un salón magistral de la Universidad del Norte. Esta práctica permitió calibrar los atributos medibles de las personas y obtener un modelo que represente de manera cercana una condición de evacuación. En el capítulo 4 se presentará este modelo aplicado a una evacuación de una edificación, realizando un análisis de sensibilidad con el fin de obtener un plan de evacuación flexible.

3.1 Descripción del Modelo

Se desarrolló un modelo basado en agentes (ABM) con el fin de representar el fenómeno emergente al simular el comportamiento local de cada individuo, siendo este el principio básico de simulación microscópica. ABM es una técnica de modelación para simular interacciones individuales en un sistema dinámico, adicionando reglas complejas de comportamiento en un entorno con peatones heterogéneos. Los agentes son entidades móviles capaces de tomar decisiones de forma autónoma basándose en aspectos reactivos, proactivos y sociales para alcanzar sus objetivos fijos.

NetLogo es una plataforma de modelación desarrollada por Uri Wilensky (2010) para simular fenómenos naturales y sociales complejos, permitiendo explorar la conexión entre el comportamiento a nivel micro de las entidades y los patrones en el sistema a nivel macro

que se generan de la interacción entre estas (Railsback & Grimm, 2011). Su ventaja radica en su poderoso, avanzado pero simple entorno de simulación multiagente escrito en Java pero programable en lenguaje Logo, permitiendo al diseñador enfocarse en las propiedades de todos los agentes bajo diferentes condiciones de comportamiento o de entorno. Por tanto, NetLogo 3D 5.3 fue escogido para modelar eventos de peligro con una gran cantidad de personas a evacuar.

La estructura del entorno es geométricamente representada por una grilla tridimensional de pequeñas celdas, donde cada una puede estar vacía u ocupada por un obstáculo o peatón. El tamaño de las celdas es de $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$, el cual es aproximadamente el espacio típico que es ocupado por un peatón en una multitud (C Burstedde, Klauck, Schadschneider, & Zittarz, 2001).

En NetLogo, el tiempo transcurre por medio de pasos discretos llamados ticks, donde cada uno representa un tiempo real diferente debido a que se basa en distintas velocidades de movimiento por ocupante. Por ejemplo, supongamos que la velocidad promedio de un peatón es de $0,7\text{ m/s}$ y cada entidad sin interactuar con otros se mueve 40 cm por time step (ts). Por tanto, un ts se calcula de la siguiente manera (ver Ecuación (3.1)).

$$ts = \frac{\text{distancia de desplazamiento del peatón por tick}}{\text{velocidad promedio del peatón}} \quad (3.1)$$

Esto da un estimado para el tiempo real correspondiente a un ts de aproximadamente 0,57 segundos.

En el modelo se pueden dar instrucciones a cientos de agentes, los cuales operan independientemente bajo una serie de comandos en forma de procedimientos. Estas entidades se rigen bajo la vecindad de Moore como tipo de desplazamiento. En la simulación, los peatones pueden escoger 9 posibles direcciones de movimiento en un solo paso, es decir, pueden trasladarse a las 8 posibles posiciones y llegar a una celda adyacente, o pueden elegir no moverse debido a un obstáculo (ver Figura 2-2). Esta decisión depende directamente del objetivo individual de cada agente, direccionándolo a la celda que le permita maximizar su utilidad (ver Anexo 6).

Se consideran múltiples estrategias de enrutamiento, donde dicho componente asume que la probabilidad de elegir una posible ruta está en función de factores potenciales que pueden afectar una evacuación o el comportamiento de multitudes y de la atracción relativa de cada opción. Por tanto, el concepto de teoría aleatoria de la utilidad entra en contexto, donde cada variable representa un atributo de la opción o del agente, y donde la influencia de cada atributo en el valor de la utilidad es dada por sus coeficientes (Ortúzar & Willumsen, 2011).

De acuerdo con Tan, Wu, Lin (2015), suponiendo que se encuentran N peatones en un área determinada a evacuar ante una emergencia y existen T posibles rutas; el universo de peatones \tilde{A} y las rutas \tilde{R} pueden ser expresados por las Ecuaciones (3.2) y (3.3).

$$\tilde{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_N\} \quad (3.2)$$

$$\tilde{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_T\} \quad (3.3)$$

Cada agente A_n tiene un vector que indica cual estrategia de ruta es escogida, como se muestra en Ecuación (3.4).

$$y'_{tn} = [y'_{1n} \dots y'_{Tn}] \quad (3.4)$$

Como se observa en las Ecuaciones (3.5) y (3.6), y'_{tn} se encuentra restringido por dos posibles valores, considerando que cada ocupante puede tomar únicamente una estrategia de ruta.

$$y'_{tn} = \begin{cases} 0, & \text{si la estrategia } t \text{ no es tomada por el peatón } n \\ 1, & \text{si la estrategia } t \text{ es tomada por el peatón } n \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\sum_{t=1}^T y'_{tn} \equiv 1 \quad (3.6)$$

De igual manera, la Ecuación (3.7) y (3.8) presenta las probabilidades de elegir cada estrategia por cada peatón, es decir, P'_{tn} es la probabilidad de elegir la estrategia de ruta t

por el peatón n . Como lo representa la Ecuación (3.9), la suma de las probabilidades por peatón debe ser igual a 1.

$$P'_{tn} = [P'_{1n} \dots P'_{Tn}] \quad (3.7)$$

$$P'_{tn} = \begin{cases} 0, & \text{si } y'_{tn} = 0 \\ p, & 0 \leq p \leq 1 \text{ si } y'_{tn} = 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\sum_{t=1}^T P'_{tn} \equiv 1 \quad (3.9)$$

La función de utilidad neta U'_{tn} se representa de manera lineal como lo muestra la Ecuación (3.10). Ya que no se puede conocer la información de todos los atributos considerados por un individuo para tomar la decisión, se asume que U'_{tn} puede ser representado por dos componentes. El primer componente V'_{tn} es una función de todos los k atributos medibles (x_{tkn}), siendo θ una constante para todos los individuos (ver Ecuación (3.11)). Por otra parte, ε_{tn} es el componente aleatorio que refleja los gustos particulares del agente, evidenciando los errores de observación o las irracionalidades al modelar cada individuo (Ortúzar & Willumsen, 2011). Por ejemplo, no siempre la persona escoge lo que parece ser la mejor opción o dos personas con los mismos atributos pueden elegir diferentes alternativas, demostrando de esta manera la completa heterogeneidad o comportamiento impredecible de los ocupantes.

$$U'_{tn} = V'_{tn} + \varepsilon_{tn} \quad (3.10)$$

$$V'_{tn} = \sum_k \theta_k x_{tkn} \quad (3.11)$$

El modelo Logit Multinomial (MNL) es un tipo de modelo de elección discreta que se genera asumiendo residuales como variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidos (IID), las cuales siguen una distribución Gumbel con media 0. Este enfoque permite analizar aquellas decisiones donde la persona elige entre varias posibilidades y donde la utilidad debe ser dada en un valor de probabilidad entre 0 y 1.

$$P'_{tn} = \frac{\exp(V_{tn})}{\sum_T \exp(V_{tn})} \quad (3.12)$$

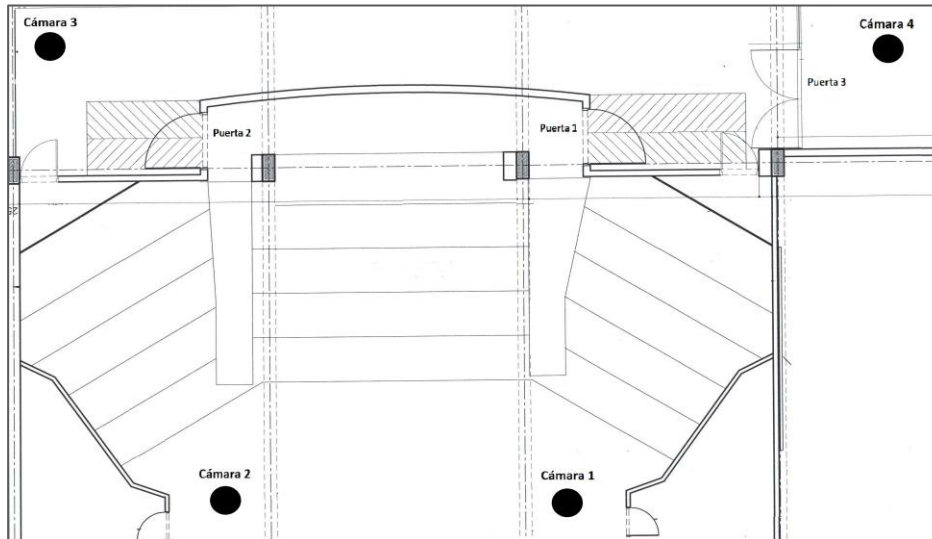
De la Ecuación (3.12) se elige la estrategia de ruta que tenga mayor probabilidad de selección, considerando primeramente un componente aleatorio. Por ejemplo, asumiendo que se consideran dos posibles estrategias de evacuación, la elección final de ruta r_n se calcula de la siguiente manera. Se obtiene un número aleatorio α y se evalúa dentro de cual intervalo se encuentra el valor, dando más peso a la opción que tiene mayor probabilidad de elección (ver Ecuación (3.13)).

$$r_n = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \alpha < P_{1n} \\ 2, & \text{si } P_{1n} \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

3.2 Calibración de patrones de comportamiento de los peatones en situaciones de emergencia

Se realizó un simulacro de evacuación en un salón de la Universidad del Norte con el fin de obtener información de los patrones de comportamiento que se pueden presentar en una evacuación con dos posibles estrategias de ruta, tales como tiempos de reacción, velocidades, densidades y características de las personas. Para este ejercicio participaron 73 estudiantes de tercer semestre de Ingeniería Civil.

Figura 3-1: Plano del salón y ubicación de las cámaras



Los estudiantes se encontraban recibiendo una clase cuando una persona externa al lugar les informó que había una emergencia y que debían evacuar de una forma calmada y organizada. La práctica fue grabada en formato audiovisual en varios puntos estratégicos seleccionados de manera que permitieran analizar a todos los ocupantes en diferentes ángulos de visión (ver Figura 3-1). Las personas deben elegir la ruta de salida que consideren más conveniente, saliendo primeramente por la Puerta1 o por la Puerta2, para luego evacuar por la Puerta3.

3.2.1 Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de las personas

Al analizar los videos, se identificaron los factores que podrían impactar en el comportamiento de las personas, influyendo en el tiempo total de evacuación. De los factores identificados en la literatura y de lo observado en el simulacro de evacuación, se presentan las variables psicológicas, fisiológicas, sociales y del entorno a considerar en la investigación, describiendo su relevancia para el modelo planteado.

En la literatura se identificaron muchos más factores, tales como edad, nivel de pánico, nivel de conocimiento del lugar, número de líderes, estructura de grupos, psicología de desastres y presencia de contraflujo. Estas variables no se consideraron en el modelo ya que no fueron factores observables en el simulacro o no había una variación significativa entre sus posibles resultados. Por ejemplo, la edad promedio de los estudiantes fue de 17–18 años, los cuales tenían conocimiento completo del lugar a evacuar.

Por tanto, los siguientes factores serán considerados en el modelo propuesto:

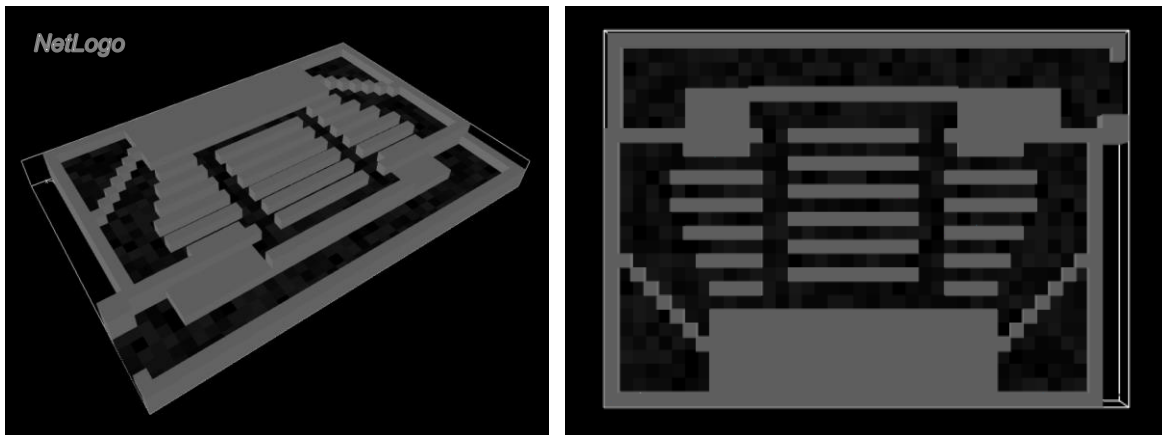
- **Género.** Se observó en la práctica que los hombres tienden a manejar una mayor velocidad de movimiento que las mujeres. Esto evidenció la necesidad de analizar la velocidad de los agentes de manera independiente por tipo de género. Los datos de la distribución de las personas por género se presenta en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Distribución de los estudiantes por género

Categoría	Número	Porcentaje
0: Masculino	43	58,9 %
1: Femenino	30	41,1%

- **Distancia a la puerta (x_{tn}).** Es uno de los factores que influye en la elección de ruta de los agentes. Muchas veces las personas prefieren elegir una salida que se encuentre más cercana a su ubicación actual, considerando que podría salir más rápido del lugar cuando la densidad para llegar a la puerta no es significativa.
- **Presencia de obstáculos.** En este modelo se consideraron todos los obstáculos existentes en el lugar del simulacro. Las paredes y las sillas son entidades creadas en el modelo con el fin de ocupar las celdas correspondientes (ver Figura 3-2). Adicionalmente, los peatones son obstáculos móviles que se desplazan con el objetivo de salir del lugar.

Figura 3-2: Estructura del entorno, Bloque 25E



- **Densidad de personas (D_{tn}).** Este factor describe la densidad percibida por un peatón n para poder llegar a una determinada puerta t . Esta variable depende de cada individuo, de su ubicación espacial y de su respectivo tiempo de reacción antes de tomar la decisión de moverse. Cuando el individuo reconoce la necesidad de evacuar, evalúa la cantidad de personas que potencialmente pueden llegar primero a la puerta t en una determinada área de análisis.

Los siguientes factores se calibraron por medio de una serie de experimentos que permitieron obtener un adecuado conjunto de valores y así alcanzar tiempos de evacuación cercanos al valor real obtenido en el simulacro (88 segundos). En los videos se logró extraer información de cada estudiante identificando su velocidad, tiempo de reacción y elección de ruta.

- **Velocidad (v_n).** Esta variable se encuentra relacionada directamente con el tipo de género de cada individuo. Los datos de la velocidad se obtuvieron calculando la distancia que tiene cada agente para llegar a la puerta elegida por el tiempo requerido para evacuar por dicha salida, es decir, desde el momento que toma la decisión de moverse hasta llegar al objetivo. Por medio de una prueba de bondad de ajuste para cada tipo de sexo se obtuvo lo siguiente:

- **Masculino:** P-Value de $0,0628 \geq 0,05$. Se concluyó que no se rechaza la hipótesis nula y se afirma con un 95% de confianza que los datos siguen una distribución normal con media de 0,377596 m/s, y una desviación estándar de 0,182453.
- **Femenino:** P-Value de $0,363643 \geq 0,05$. Esto indica que no se rechaza la hipótesis nula y se concluye con un 95% de confianza que los datos siguen una distribución triangular TR(0.0816232, 0.308078, 0.512585) m/s.

Para calibrar esta variable se consideró un factor de ajuste de velocidad β_1 . Por medio de este factor se busca conocer cuánto puede aumentar la velocidad de manera que permita obtener tiempos de evacuación cercanos al del simulacro.

Tiempo de reacción (T_n). Hace referencia al tiempo que transcurre antes de empezar a evacuar, es decir, el tiempo necesario para confirmar una emergencia. La existencia de este factor puede mitigar la congestión ya que los individuos reaccionan en diferentes momentos. Se evaluaron los datos obtenidos por medio de una prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, teniendo como resultado un P-Value de $0,5728 \geq 0,05$. Con este valor se puede concluir que no se rechaza la hipótesis nula y se afirma con un 95% de confianza que los datos siguen una distribución triangular TR(3.84747, 33, 43.5156) segundos.

Al igual que la velocidad, se determinó un factor de ajuste del tiempo de reacción β_2 . Se analizaron diferentes escenarios de simulación con el fin de conocer el valor de β_2 que permita disminuir el tiempo de reacción para obtener un tiempo total de evacuación cercano al del simulacro.

• **Elección de Ruta (r_n).** El peatón selecciona una estrategia de ruta considerando dos principales factores o atributos: la densidad percibida por el agente para salir por una determinada puerta y la distancia desde la celda ocupada por la persona a la salida. Por tanto, entre más pequeña sea la distancia, mayor es la probabilidad de elegir dicha opción. De igual manera, entre más pequeña sea la densidad percibida por la persona para llegar a una determinada puerta, mayor es la probabilidad de escoger esa ruta. De lo observado en el simulacro, la distribución de personas por ruta elegida se presenta en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Número de personas por ruta elegida

Categoría	Número	Porcentaje
1: Ruta 1	49	67,12 %
2: Ruta 2	24	32,88%

Teniendo los datos de la densidad percibida por los peatones y su respectiva distancia a cada puerta, se buscó conocer el valor de cada uno de sus coeficientes θ_k para modelar el proceso de decisión de cada agente. Por medio de la herramienta Biogeme 2.2 se estimaron los parámetros del modelo de elección discreta propuesto. La función de utilidad para la elección de una estrategia de ruta ante una evacuación se muestra en la Ecuación (3.14).

$$V'_{tn} = -0,27 * x_{tn} - 0,908 * D_{tn} \quad (3.14)$$

La probabilidad de elegir la Puerta 1 como posible ruta de evacuación es la siguiente (ver Ecuación (3.15)). Por otro lado, la Ecuación (3.16) presenta la probabilidad escoger la Puerta 2 como opción de salida.

$$P'_{1n} = \frac{\exp(V_{1n})}{\exp(V_{1n}) + \exp(V_{2n})} \quad (3.15)$$

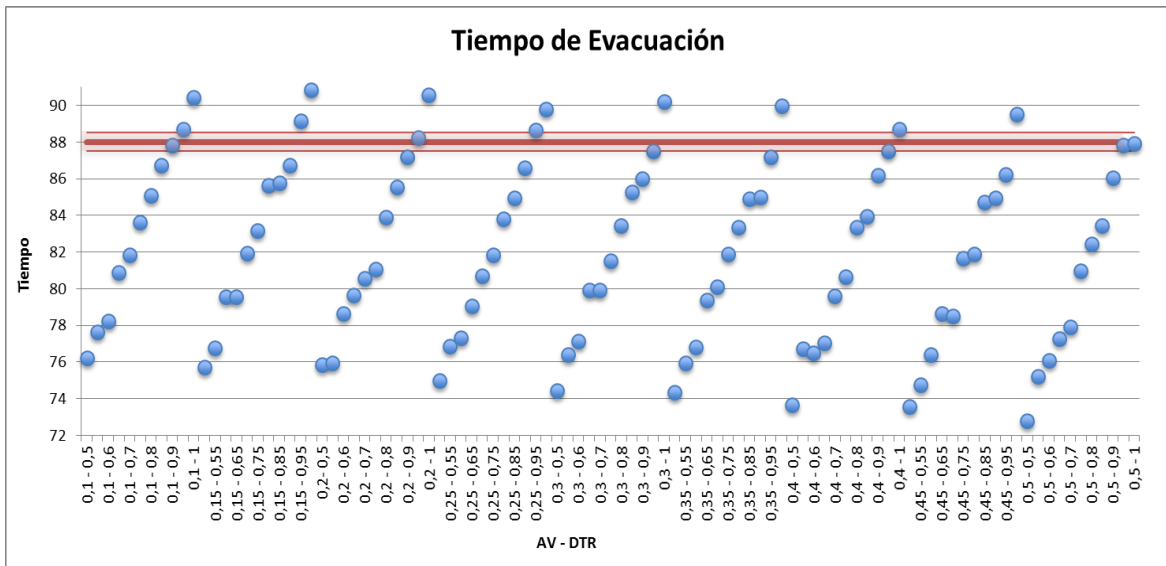
$$P'_{2n} = 1 - P'_{1n} \quad (3.16)$$

Luego, se implementó la Ecuación (3.13) para incluir el componente aleatorio en el modelo, obteniendo el valor de la variable de ruta r_n de cada agente.

3.2.2 Escenarios de simulación

Conociendo los factores que influyen en la evacuación, se procedió con el desarrollo del experimento variando los factores de ajuste β_1 y β_2 . Para cada combinación se realizaron 50 corridas obteniendo el promedio de cada uno. Los resultados se presentan en la Figura 3-3.

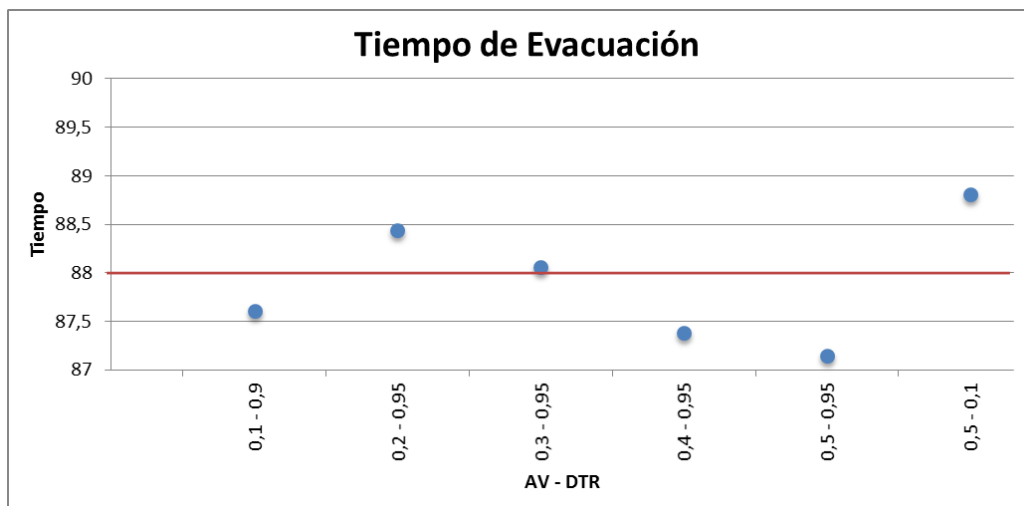
Figura 3-3: Combinación ($\beta_1 - \beta_2$) vs. Tiempo de evacuación



El simulacro tuvo como resultado un tiempo total de evacuación de 88 segundos. Por medio de esta calibración se buscó obtener una combinación de variables de comportamiento que tengan como efecto un tiempo total de evacuación lo más cercano al valor real. Por tanto se consideró como intervalo de aceptación las combinaciones que entreguen como resultado un tiempo de evacuación entre 87,5 y 88,5 segundos. Se identificaron 6 combinaciones de valores de factores de velocidad y tiempo de reacción. Para cada una se realizó un experimento de 1000 réplicas, obteniendo los siguientes resultados (ver Tabla 3-3).

Tabla 3-3: Tiempo total de evacuación por combinación de factores

$\beta_1 - \beta_2$	Tiempo de Evacuación (TE)	Error $\varepsilon = TR-TE$
0,1 - 0,9	87,61	0,39
0,2 - 0,95	88,44	-0,44
0,3 - 0,95	88,06	-0,06
0,4 - 0,95	87,38	0,62
0,5 - 0,95	87,15	0,85
0,5 - 0,1	88,81	-0,81

Figura 3-4: Combinación ($\beta_1 - \beta_2$) vs errores

La combinatoria 0,3 – 0,95 proporciona el resultado más cercano al valor real de tiempo total de evacuación, con un error de 0,06 segundos (ver Figura 3-4.). Por tanto, un aumento del 30% en los parámetros de la distribución de la velocidad y una disminución del 5% en los parámetros del tiempo de reacción son los adecuados para concluir que el modelo de evacuación se encuentra calibrado. Con estos resultados se puede afirmar que el modelo de evacuación representa de manera cercana el comportamiento de las personas y las condiciones que se pueden presentar al momento de una situación de emergencia.

4. Modelo de evacuación en edificaciones

El modelo de simulación planteado en el capítulo anterior representa la evacuación de un espacio cerrado en el cual se analiza el proceso de toma de decisiones de las personas considerando diferentes rutas de evacuación. En este capítulo se presentan los resultados del modelo aplicado a una evacuación de un edificio. Adicionalmente, se describe el análisis de sensibilidad del modelo, evaluando de forma dinámica el desempeño de distintos escenarios de evacuación. Estos resultados se tomaron como base para el diseño de un nuevo plan de evacuación, el cual se presentará en el capítulo siguiente.

4.1 Análisis de la estructura

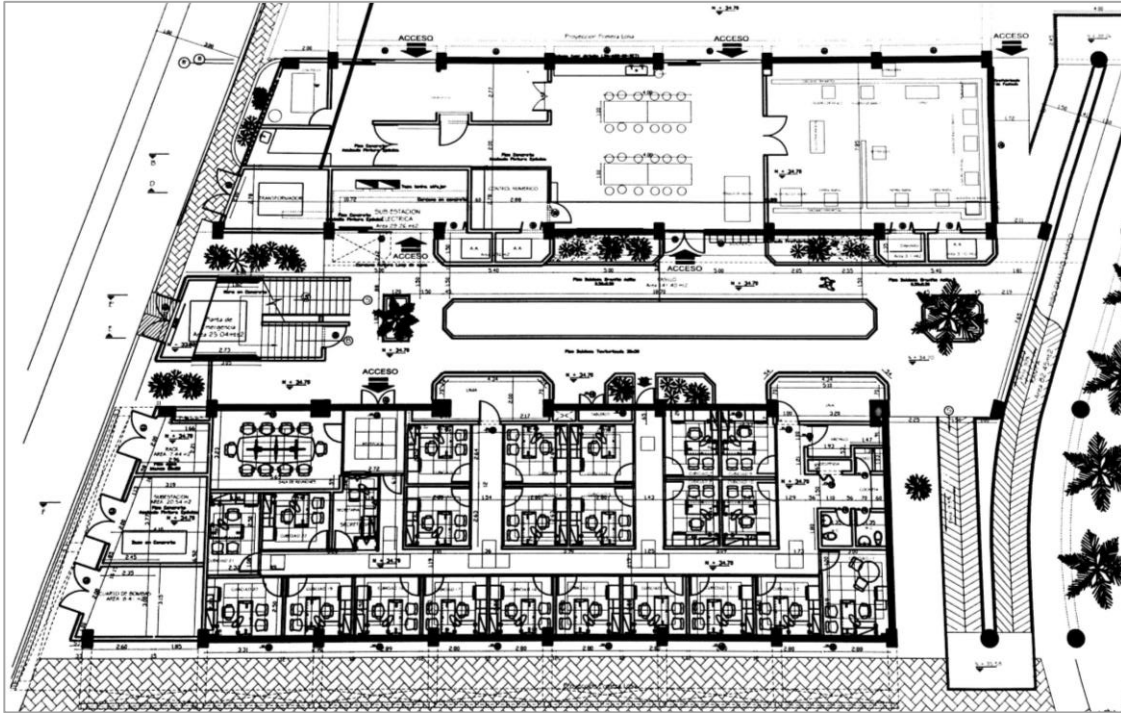
El edificio Julio Mudvi de la Universidad del Norte fue escogido para esta investigación por la necesidad de analizar la conexión que existe no solamente entre las escaleras y cada uno de los pisos, sino también por la presencia de las rampas como medio de evacuación alternativo.

Para poder construir la estructura del lugar en la plataforma NetLogo, se realizó un reconocimiento de la edificación. Para esto se contó con los planos respectivos (ver Figura 4-1), uno por piso que incorpore la infraestructura y donde se demarquen las zonas, los puntos importantes y sus respectivas capacidades. Los planos se encontraban en una escala 1:200, es decir, 1 metro del plano equivale a 200 metros del edificio. Todos estos datos se trasladaron al software de simulación obteniendo el siguiente entorno de modelación (ver Figura 4-2).

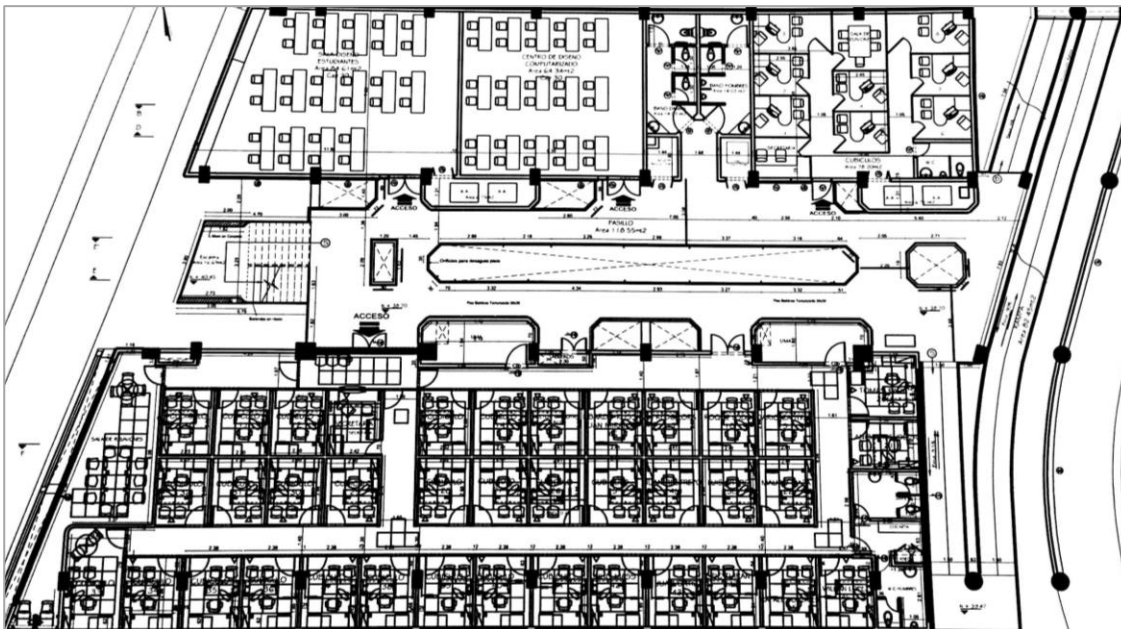
En la Figura 4-2a se observa el edificio de cuatro niveles identificando las rampas que conectan a cada piso. Las rampas son de inclinación constante durante todo su recorrido, permitiendo la accesibilidad a personas que presentan deficiencia motriz. Por otro lado, la Figura 4-2b presenta las escaleras como medio de evacuación, las cuales cumplen con el

numeral 4.1.2 de la NTC 1700, con un requisito de un ancho mínimo libre de obstáculos de 1 metro (ICONTEC, 2004).

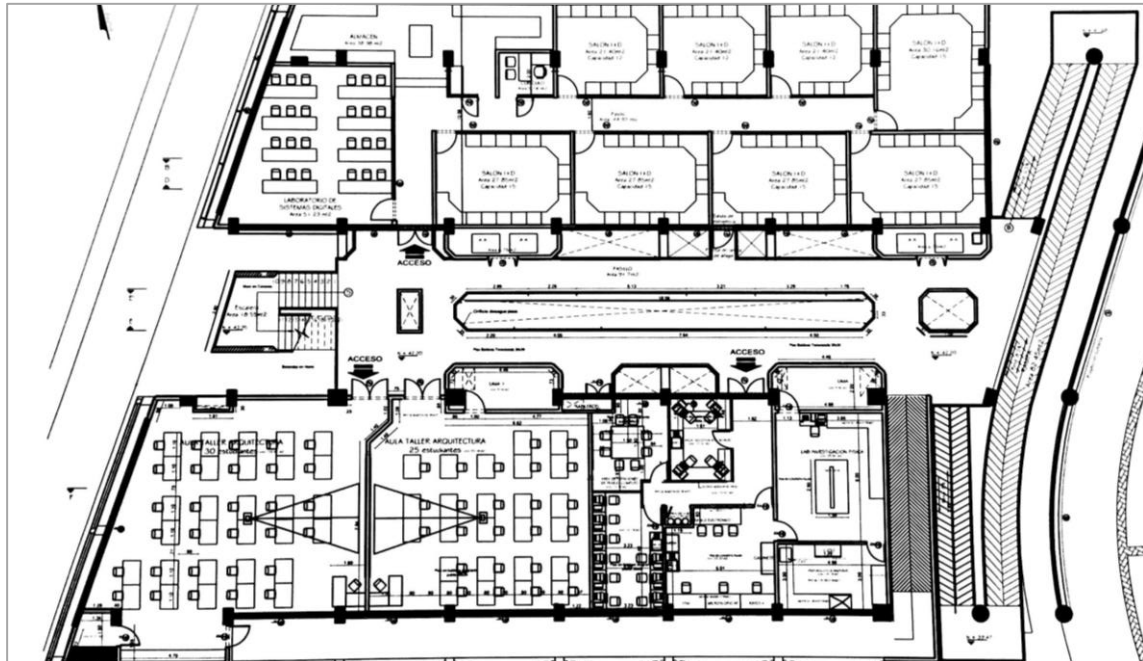
Figura 4-1: Planos del edificio Julio Muvdi, Universidad del Norte



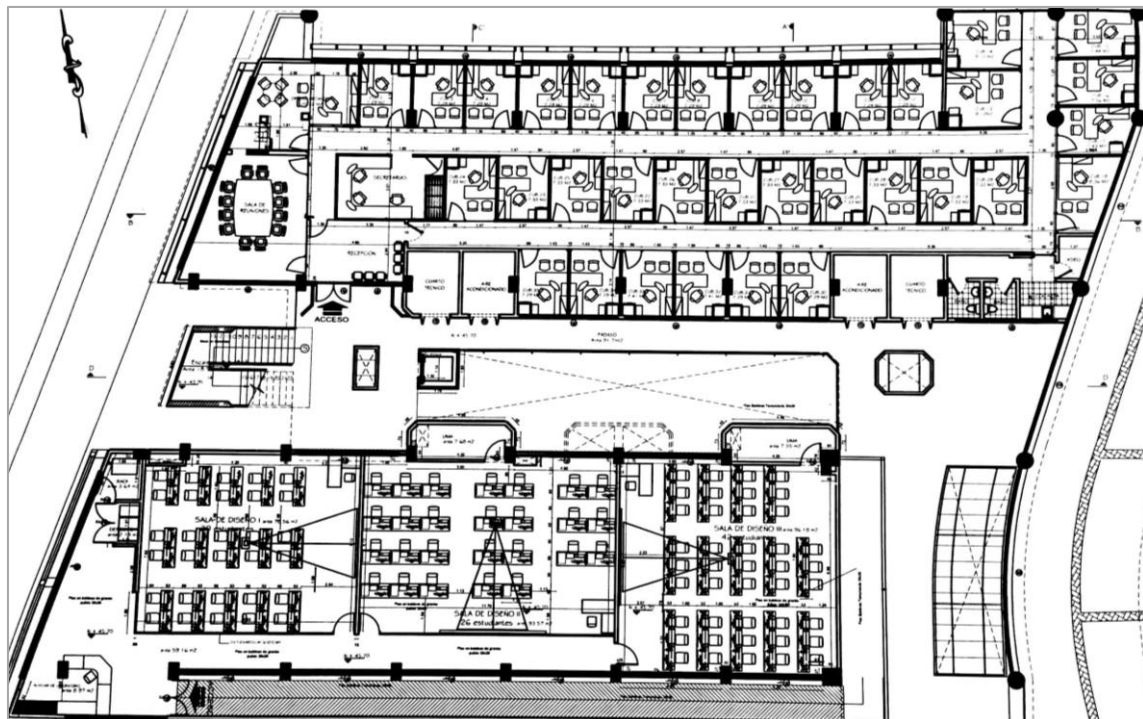
(a) Plano del edificio piso 1



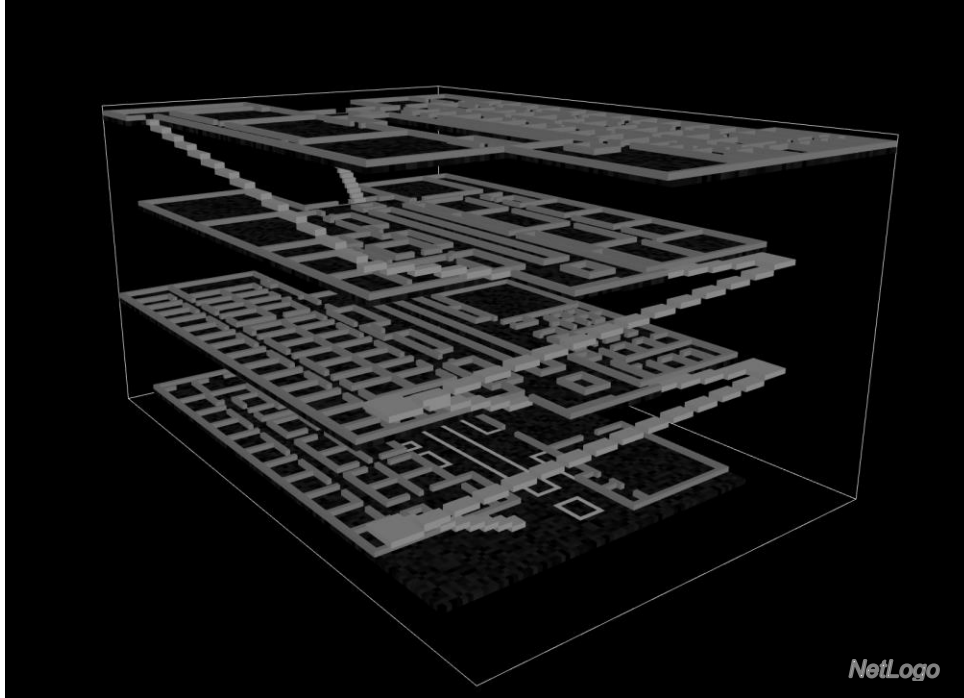
(b) Plano del edificio piso 2



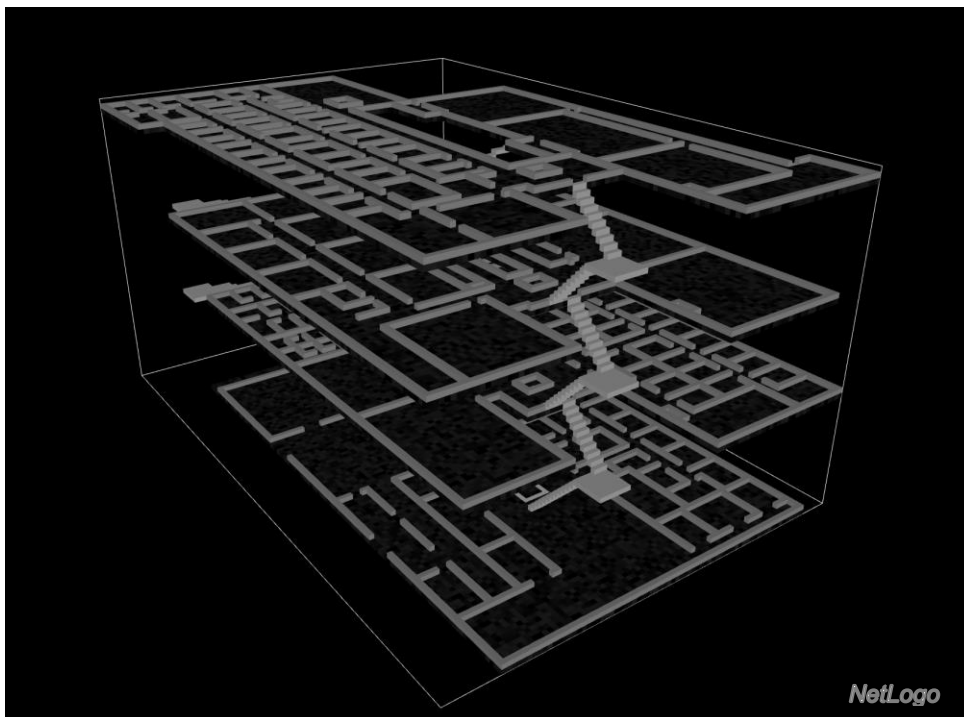
(c) Plano del edificio piso 3



(d) Plano del edificio piso 4

Figura 4-2: Estructura completa del edificio Julio Muvdi, Universidad del Norte

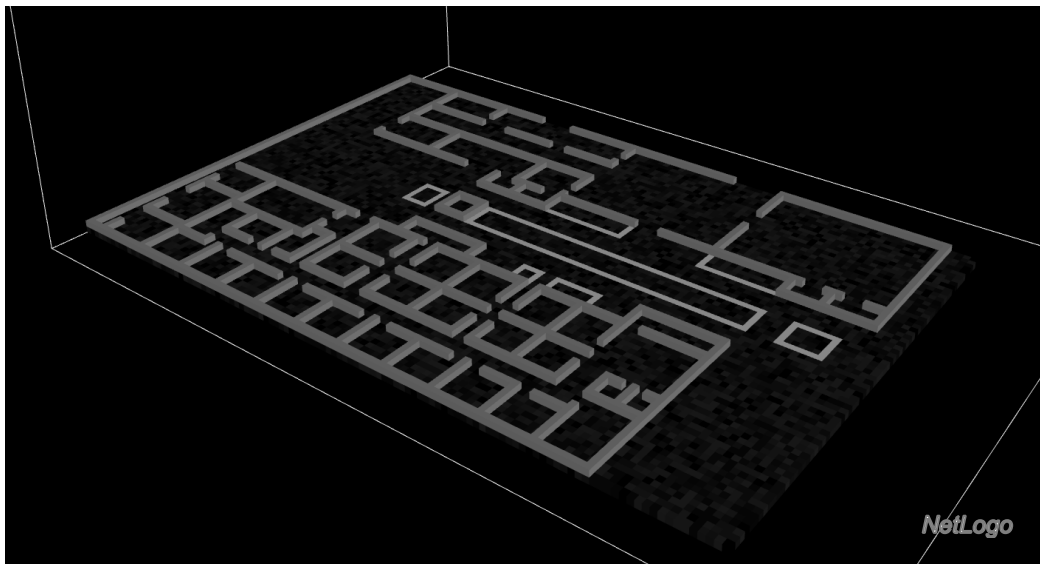
(a) Estructura del edificio identificando las rampas



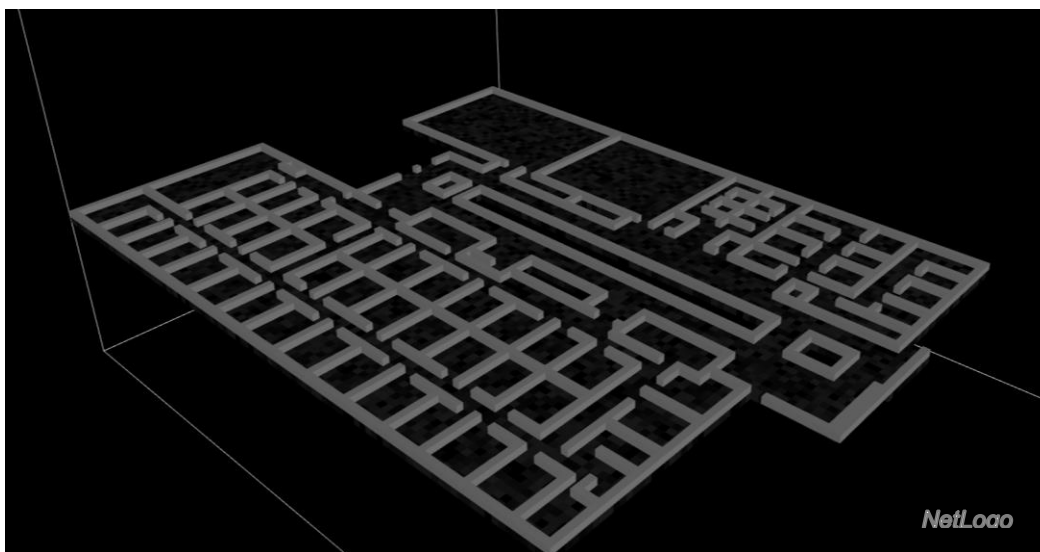
(b) Estructura del edificio identificando las escaleras

De igual manera, la estructura por piso se presenta en la Figura 4-3, identificando la presencia de obstáculos (paredes y barandas). El primer piso cuenta con un ascensor que comunica directamente con el piso 4 (ver Figura 4-3a). Debido a que se está analizando una evacuación ante emergencias, el ascensor se inhabilita como medio de evacuación y por tanto, se considera un obstáculo adicional.

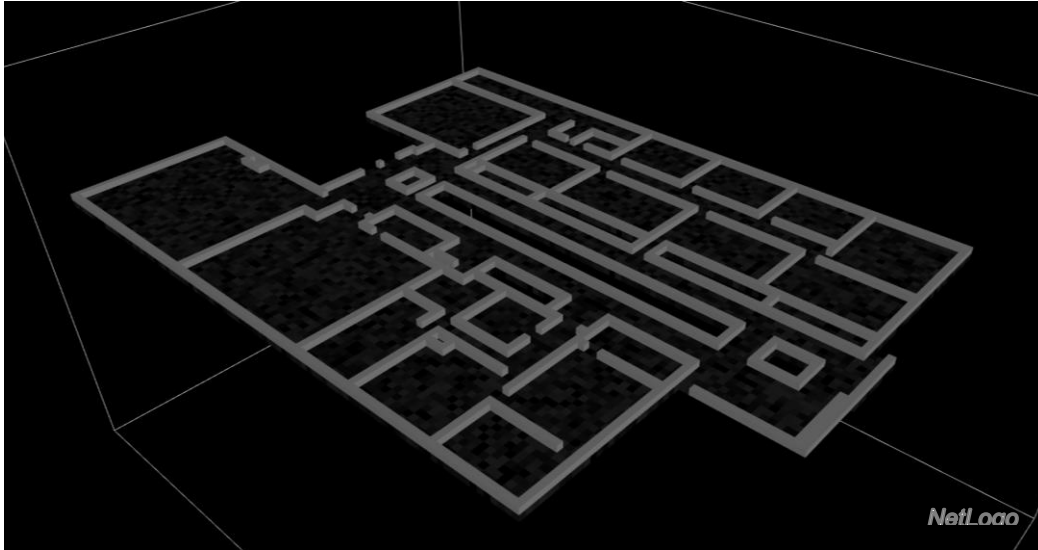
Figura 4-3: Estructura por piso del edificio Julio Muvdi, Universidad del Norte



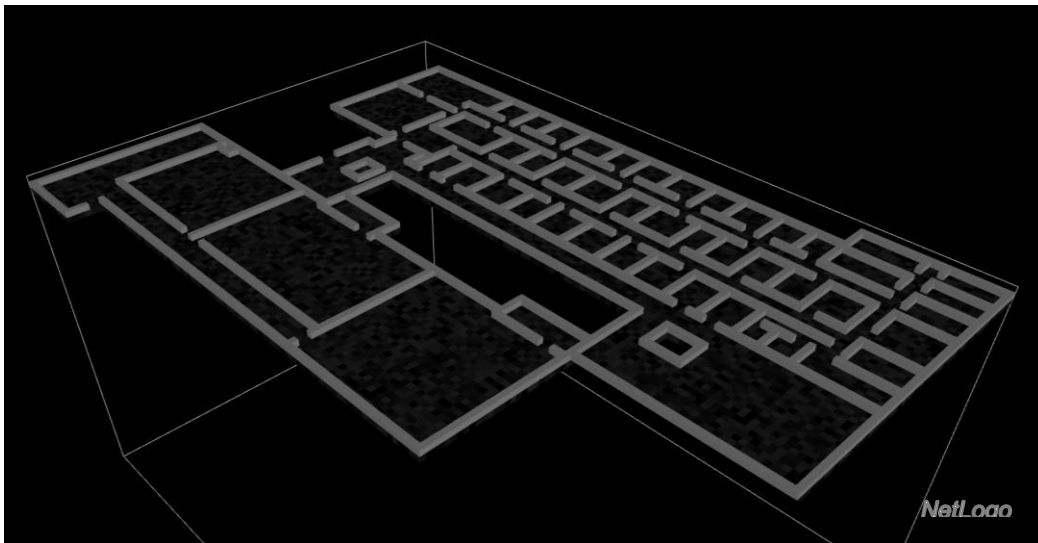
(a) Estructura del primer piso, Edificio Julio Mudvi



(b) Estructura del segundo piso, Edificio Julio Mudvi



(c) Estructura del tercer piso, Edificio Julio Mudvi



(d) Estructura del cuarto piso, Edificio Julio Mudvi

Una vez construida la estructura del entorno se crearon los agentes móviles en el modelo considerando las capacidades por zona, obteniendo un aproximado de 500 personas en todo el edificio. Los agentes fueron ubicados de manera aleatoria en cada una de las zonas definiendo sus respectivos atributos (género, tiempo de reacción y velocidad) y variables (elección de ruta, densidad percibida, tiempo individual de evacuación). Con el fin de analizar el sistema a un nivel macro, se incluyeron unas variables globales, siendo estas, el tiempo total de evacuación y el número de personas afectadas.

4.2 Cálculo del número óptimo de réplicas en una simulación

Al ejecutar un modelo de simulación, el valor promedio de una variable de respuesta cuenta con un periodo de inestabilidad, y conforme se implementen más corridas, el valor de esa variable tiende a un estado estable, entregando de esta manera resultados más precisos y cercanos al valor real. Debido a la naturaleza aleatoria del sistema, se realizó el cálculo del número óptimo de réplicas con el fin de obtener resultados confiables (Kelton, 2002). Por tanto, para minimizar ese error se debe aumentar el número de muestras reduciendo al mínimo posible la amplitud media o half width (h) del intervalo de confianza de los datos, teniendo en cuenta el tiempo requerido para realizar una corrida. El cálculo de h se presenta en la Ecuación (4.1).

$$h = t_{n-1, 1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Con el fin de obtener una aproximación del tamaño de muestra requerido, se puede reemplazar la distribución t-student en la Ecuación (4.1) con el valor crítico de la distribución normal considerando el teorema del límite central, ya que los valores asociados son muy cercanos cuando el tamaño de muestra (n) es mayor a 30.

$$h \cong z_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

Se considera n_0 el valor del número de muestras iniciales y σ_0 la desviación estándar de la muestra inicial. Adicionalmente, h_0 representa el valor asociado a n_0 (ver Ecuación (4.3)).

$$h_0 \cong z_{1-\alpha/2} \frac{\sigma_0}{\sqrt{n_0}} \quad (4.3)$$

Sea n el número óptimo de réplicas, σ_e el valor esperado de la desviación estándar y h_e el valor esperado de h dado por n . Al despejar $z_{1-\alpha/2}$ de las ecuaciones (4.3) y (4.4) se obtiene la Ecuación (4.5).

$$h_e \cong z_{1-\alpha/2} \frac{\sigma_e}{\sqrt{n_e}} \quad (4.4)$$

$$z_{1-\alpha/2} = \frac{h_e \sqrt{n_e}}{\sigma_e} = \frac{h_0 \sqrt{n_0}}{\sigma_0} \quad (4.5)$$

Por tanto, el cálculo del número óptimo de réplicas de un modelo de simulación, suponiendo que $\sigma_0 \approx \sigma_e$, debido a que si la muestra ha sido desarrollada de manera aleatoria, representativa e independiente, se podría asumir que σ_0 se convierte en un buen estimador de σ_e , tal como se presenta en la Ecuación (4.6).

$$n = \frac{n_0 h_0^2}{h_e^2} \quad (4.6)$$

4.3 Resultados del caso de estudio con relación al tiempo total de evacuación

Para obtener los resultados del tiempo de evacuación se analizó como primera medida la velocidad de las personas al bajar por las escaleras o por las rampas. Se realizaron una serie de pruebas para conocer el tiempo que normalmente demoran las personas en bajar por cada medio de salida. Se creó un factor α para ajustar la distribución de probabilidad de la velocidad tanto para hombres como para mujeres, con el objetivo de obtener un solo valor de ajuste, es decir, aumentando la velocidad un cierto porcentaje.

Estas pruebas consistían en obtener el tiempo de 10 personas y compararlo con el tiempo de evacuación en la simulación al ir aumentando el factor. Los resultados afirman que los tiempos de salida tanto simulados como reales son muy similares al aumentar al doble la velocidad del agente en las rampas o escaleras. Por tanto, toda persona que acceda a estos medios presentará el doble de velocidad que al desplazarse en cada piso.

Al simular la evacuación del Edificio Julio Muvdi, se consideró un $n_0 = 30$ y un nivel de confianza del 95%. Se definió un valor para h_e de 1,5 segundos, teniendo en cuenta la restricción de tiempo de cada corrida y la disminución de h hasta un valor de tiempo mínimo. La Tabla 4-1 presenta los datos para obtener el número de réplicas, obteniendo un n óptimo de 298 réplicas, incluyendo las 30 iniciales. Con un total de 500 personas en el edificio, se obtuvo un tiempo total de evacuación de 404,6139 segundos, con una desviación estándar de 11,1799 segundos.

Tabla 4-1: Resultados del modelo existente en cuanto al tiempo de evacuación

σ_0	12,5079
h_0	4,4750
n	268
Tiempo de evacuación (seg)	404,6139
σ	11,1799
Intervalo de confianza	404,6139 $\pm 1,2693$

4.4 Resultados del caso de estudio con relación al número de personas afectadas

El modelo de simulación de evacuaciones entrega el número de personas afectadas que se pueden generar ante un evento de emergencia, en donde cada agente identifica el suceso y reacciona en un tiempo determinado. Esta variable analiza el número de personas que no logran evacuar del edificio en un cierto tiempo. Debido a que se está evaluando una emergencia en general y se desconoce el tiempo específico a partir del cual las personas no logran salir, se analizó el comportamiento de la evacuación de acuerdo al número de personas evacuadas en distintos puntos de tiempo. Para identificar estos puntos se calculó el número de clases (C) requeridos para la construcción de la gráfica de número de evacuados con respecto al tiempo. Para aplicar la Ley de Sturges (ver Ecuación (4.7)) y conocer el valor de C , se analizó la evacuación con un total de 500 personas en el edificio. Se definió un rango (R) de 450 segundos y de la Ecuación (4.8) se calculó la amplitud (A) con un número de clases igual a 10. Por tanto, la evacuación se analizó cada 45 segundos, identificando el número de personas que logran salir antes de un determinado tiempo.

$$C = 3,3 * \log N + 1 \quad (4.7)$$

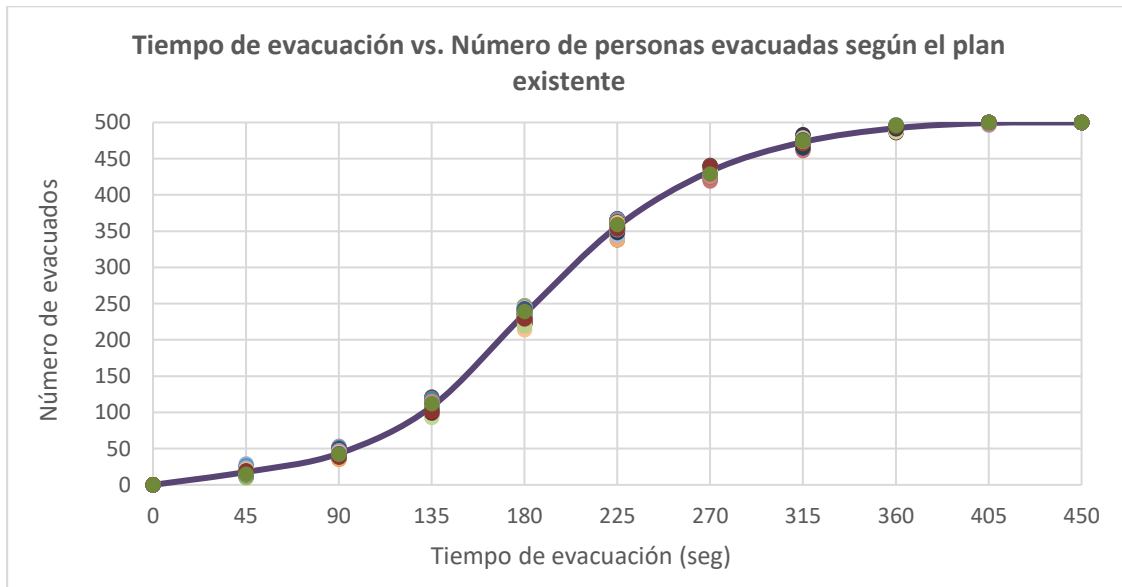
$$A = \frac{R}{C} \quad (4.8)$$

Para conocer el número de corridas se definió un valor de h_e igual a 1, teniendo en cuenta la restricción de tiempo de simulación requerido. La Tabla 4-2 presenta los datos para calcular el tamaño óptimo de réplicas, seleccionando el valor máximo de n entre todos los tiempos de análisis. Por tanto, el tamaño óptimo es de 161 réplicas, incluyendo las 30 iniciales.

Tabla 4-2: Resultados del número de evacuados según el plan existente

Tiempo de evacuación (seg)	45	90	135	180	225	270	315	360	405	450
σ_0	2,823	2,968	5,193	5,353	5,847	4,649	2,832	2,088	0,591	0
h_0	1,027	1,080	1,890	1,948	2,128	1,692	1,031	0,760	0,215	0
n	31	34	104	110	131	83	31	17	1	0
Número de evacuados	18	43	108	235	356	433	473	492	499	500

La Figura 4-4 presenta el proceso de salida que se genera al evacuar 500 personas del edificio considerando el plan de emergencia existente. La gráfica ilustra cuantas personas han evacuado en cada una de las instancias de tiempo, identificando que entre los 135 y 180 segundos se presenta una mayor tasa de salida de personas del edificio. A partir de los 180 segundos se evidenció una menor cantidad de evacuados con respecto al tiempo al observar una disminución en la pendiente de la curva.

Figura 4-4: Número de personas evacuadas según plan existente

4.5 Análisis de sensibilidad del modelo de evacuación

Se realizó un análisis de escenarios en el modelo de simulación con el fin de estudiar el desempeño de la evacuación y como el número de personas en el edificio, la elección de ruta y los medios de evacuación afectan la variable de respuesta. En el primer escenario se analizó como varía el tiempo considerando que sólo es posible utilizar un medio de

evacuación (rampas o escaleras). En el Escenario 2 se evaluó el tiempo de salida de acuerdo a la cantidad de medios de evacuación disponibles y el número de personas en el edificio. Por otro lado, en el Escenario 3 se realizó un análisis del proceso de elección de ruta, verificando si la decisión escogida por la persona permite evacuar más rápido del lugar.

4.5.1 Escenario 1

En esta primera prueba se analizaron dos supuestos. Se evaluó el desempeño de la evacuación considerando en primera instancia la disponibilidad de las escaleras como única salida de emergencia. Luego, se tuvo como supuesto que, al momento de la emergencia, las escaleras se encontraban inhabilitadas, generando que las personas decidieran evacuar por las rampas.

Para cada una de las condiciones de evacuación, se consideró como tamaño de muestra inicial un valor de 30 réplicas. A partir de estos datos se calcularon los σ_0 , h_0 y n respectivos, considerando h igual a 1,5 segundos y con un nivel de confianza del 95%. La Tabla 4-3 presenta el resumen de los resultados de la prueba, identificando el valor del tamaño óptimo de réplicas, el cual incluye las 30 réplicas iniciales.

En conclusión, el edificio Julio Muvdi debe contar siempre con la disponibilidad de las escaleras, cumpliendo con los requisitos mínimos de la norma NTC 1700, manteniendo el área libre de obstáculos y con las dimensiones requeridas (ICONTEC, 2004). En caso de encontrarse inhabilitadas las escaleras, el tiempo de evacuación aumenta considerablemente, y por tanto, puede generar un gran número de personas afectadas.

Tabla 4-3: Resumen de los resultados obtenidos en la prueba 1

Condición evacuación	σ_0	h_0	Tamaño muestra n	Tiempo total evacuación	Desviación estándar	Intervalo de confianza
Sólo rampas	22,8306	8,1698	920	667,0053	17,2254	667,0053 \pm 1,1131
Sólo escaleras	12,8324	4,5920	312	401,7934	11,5563	401,7934 \pm 1,2823

4.5.2 Escenario 2

En esta prueba se analizó el tiempo total de evacuación del edificio, considerando en primer lugar el modelo de evacuación existente. Luego, se modificó el modelo de evacuación actual de dos maneras. La primera manera considera las escaleras como único medio de evacuación, inhabilitando el uso de las rampas. Por otro lado, la segunda modificación hace referencia a la disponibilidad de las rampas, ya que las escaleras no se consideran como ruta de escape. Dentro de cada una de las tres condiciones de evacuación se evaluó como el número de personas impacta en el tiempo de evacuación, aumentando en un cierto porcentaje el número de ocupantes en ciertas zonas del edificio.

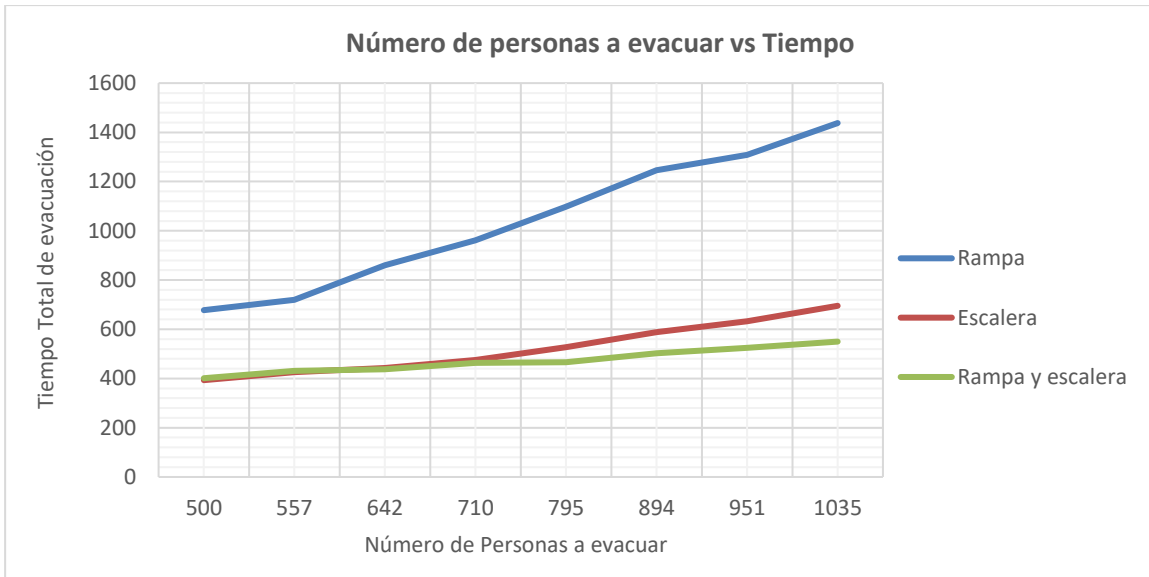
Este análisis se dividió en dos fases: una fase preliminar en la cual se identifica en que rango el porcentaje de aumento de la población genera la necesidad de utilizar tanto rampas como escaleras. Esta fase se realizó con la finalidad de pasar a una segunda fase para identificar el punto exacto donde es conveniente usar los dos medios de evacuación. Al aumentar a un cierto porcentaje el número de personas en el edificio se genera una congestión excesiva en las escaleras, conllevando a la necesidad de incorporar las rampas y así poder evacuar a las personas más rápido del lugar.

La Tabla 4-4 presenta los tiempos obtenidos en la fase 1, de acuerdo a la condición de evacuación escogida. Ya que es una fase preliminar, se escogió como tamaño de muestra para cada una de las condiciones un valor de 10 réplicas por cada uno de los porcentajes de aumento. En la Figura 4-5 se observan los resultados obtenidos por cada condición, identificando que utilizar únicamente las rampas no es una estrategia conveniente por los altos tiempos de evacuación que se generan. Por otro lado, a partir del aumento del 60% de las personas en ciertas zonas es pertinente incluir el uso de las rampas, ya que entrega tiempos de evacuación menores en comparación con el uso únicamente de las escaleras.

De la fase 1 se concluye que en el rango de 40% - 80% de aumento de la población se encuentra el punto a partir del cual es conveniente incorporar las rampas como medio de evacuación y, por tanto, se analizará de manera más detallada en la fase 2.

Tabla 4-4: Tiempo total de evacuación en la fase 1

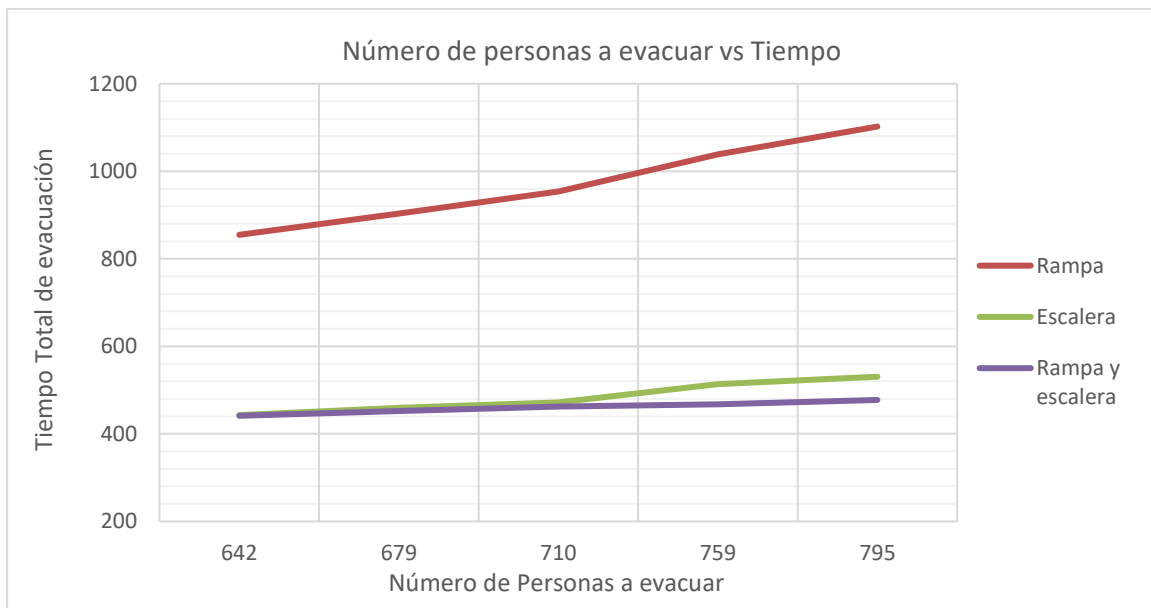
Tiempo Total de Evacuación (seg)								
% aumento cierta zonas	0%	20%	40%	60%	80%	100%	120%	140%
Cantidad de Personas	500	557	642	710	795	894	951	1035
Sólo Rampa	677,651	719,004	859,450	960,948	1098,511	1246,309	1308,840	1437,763
Sólo Escalera	393,354	426,404	442,737	475,591	527,397	588,912	633,167	695,389
Rampa y escalera	401,243	430,824	438,016	463,320	466,139	501,969	524,113	549,964

Figura 4-5: Número de personas a evacuar vs. Tiempo de evacuación (Fase 1)

De igual manera, la fase 2 evalúa los tiempos de evacuación de acuerdo al aumento de la población en ciertas zonas del edificio. En este caso se analizará el tiempo de evacuación en el rango seleccionado en la fase 1, aumentando en un 10% el número de personas a evacuar. La Tabla 4-5 presenta los resultados de tiempo de evacuación, considerando como tamaño de muestra un valor de 50 réplicas por cada porcentaje de aumento. Estos datos muestran que a partir de 642 personas en el edificio es recomendable utilizar rampas y escaleras para poder disminuir así la congestión, cambiando la ruta de salida a aquellas personas que evacuan más rápido por las rampas (ver Figura 4-6).

Tabla 4-5: Tiempo total de evacuación en la fase 2

Tiempo Total de Evacuación (seg)					
% de aumento en cierta zonas	40%	50%	60%	70%	80%
Cantidad de personas	642	679	710	759	795
Rampa	854,8517	903,1940	953,7359	1038,6495	1102,2341
Escalera	442,9219	459,3738	471,8561	513,5899	530,6207
Rampa y escalera	441,3190	451,8492	462,4645	467,4437	477,4583

Figura 4-6: Número de personas a evacuar vs. Tiempo de evacuación (Fase 2)

4.5.3 Escenario 3

En esta última prueba se evaluaron las decisiones de las personas, analizando si la ruta de evacuación escogida es la conveniente. Este aspecto se estudiará al considerar diferentes zonas de ubicación de las personas, midiendo el tiempo total que requieren para evacuar por cada una de las rutas. Estos resultados son utilizados para diseñar el nuevo de plan de evacuación que se presentará en el capítulo siguiente.

Se analizaron dos agentes a los cuales se les asignaron los mismos valores de velocidad y tiempo de reacción. Cada agente se mueve con una velocidad promedio de 0,4 m/s y puede reaccionar en un tiempo de 0, 20 y 40 segundos. Por tanto, se tiene el supuesto que los dos agentes son una misma persona; uno de estos elige como medio de evacuación

las escaleras (agente verde), mientras que el otro bajará por las rampas hasta llegar a la zona segura (agente amarillo), siendo esta la salida final. Los resultados se obtuvieron teniendo en cuenta un nivel de confianza del 95% y un tamaño de muestra $n_0 = 30$.

- **Zona 1**

La persona se encuentra ubicada en una oficina del segundo piso como se muestra en la Figura 4-7. Los dos agentes se identifican por el color; el agente verde evacua por la ruta de las escaleras, mientras que el agente amarillo baja por las rampas. Se analizó la evacuación considerando tres tiempos de reacción y la ruta elegida. La Tabla 4-6 presenta los datos utilizados para calcular el n óptimo, teniendo en cuenta un $n_0 = 30$. El número de réplicas se escogió por cada tiempo de reacción, eligiendo el mayor valor entre escalera y rampa. A cada n escogido se le adicionaron las 30 réplicas iniciales.

Figura 4-7: Zona 1: Segundo piso

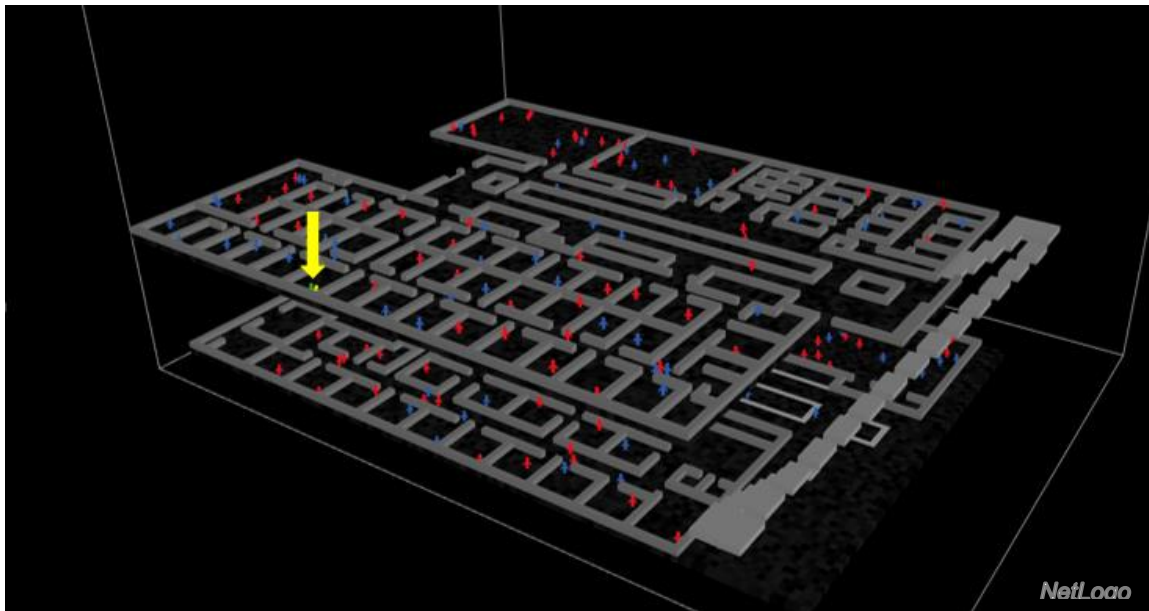


Tabla 4-6: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 1

Tiempo de reacción (seg)	σ_0		h_0		Número de réplicas		n
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	
0	6,3141	4,7051	2,2594	1,6837	69	38	99
20	5,3707	2,9694	1,9219	1,0626	50	16	80
40	6,4829	2,2134	2,3199	0,7920	72	9	102

Los tiempos de evacuación observados demuestran que es conveniente escoger las escaleras como ruta de salida sin tener en cuenta el tiempo que demoran en reaccionar y decidir evacuar (ver Tabla 4-7). Al analizar esta conclusión se puede deducir que esto se debe a que las personas se encuentran más cerca de las escaleras, mientras que por las rampas requieren recorrer una mayor distancia. Adicionalmente, en el modelo de simulación existente, la mayoría de las personas deciden evacuar por las escaleras, demostrando que dichas personas escogieron la ruta adecuada.

Tabla 4-7: Resultados Zona 1

Tiempo de reacción (seg)	Tiempo total de evacuación (seg)		Desviación estándar		Intervalo de confianza	
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa
0	166,1212	222,3889	7,3217	9,2056	166,1212 ± 1,4423	222,3889 ± 1,8133
20	188,7188	236,9500	5,9687	2,7817	188,7177 ± 1,3079	236,9500 ± 0,6095
40	218,1422	256,7255	6,8698	2,4692	218,1422 ± 1,3332	256,7255 ± 0,4792

- Zona 2**

Esta prueba se realizó de igual manera en el segundo piso, pero ubicando a los agentes como se presenta en la Figura 4-8. Al correr el modelo existente se observó que las personas prefieren evacuar por las rampas, ya que estas se encuentran a una menor distancia en comparación con las escaleras. En la Tabla 4-8 se presentan los datos para hallar el n requerido.

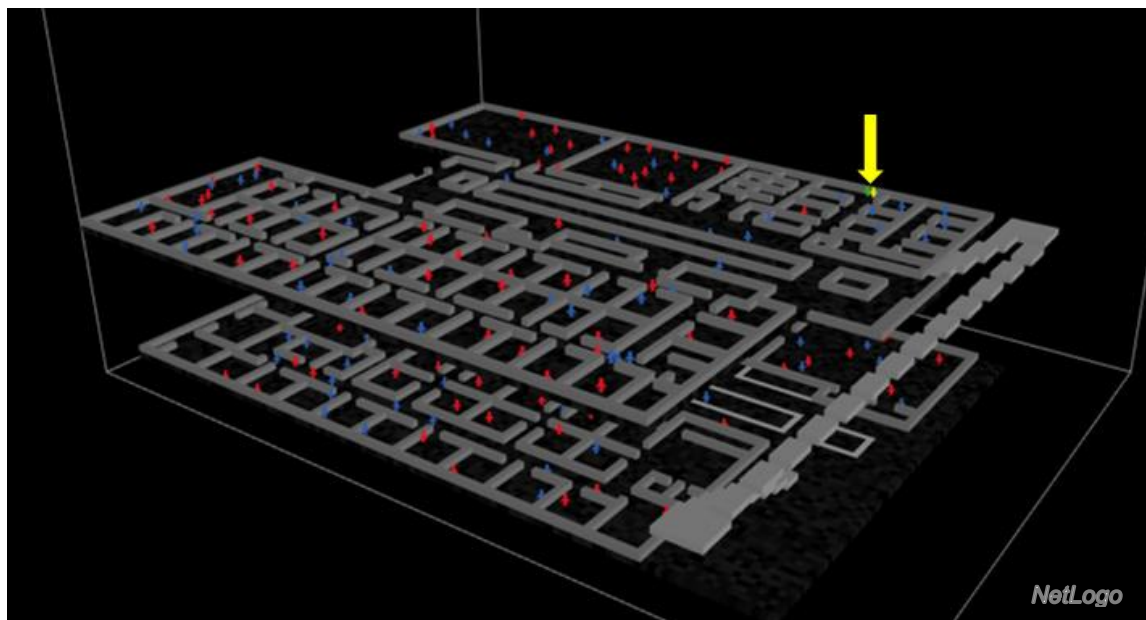
De acuerdo a lo observado en el modelo y a los resultados obtenidos en esta prueba, se puede demostrar la correcta elección de ruta de las personas, evidenciando que los ocupantes que se encuentren ubicadas por esta zona podrán evacuar más rápido por las rampas sin considerar el tiempo de reacción de cada uno (ver Tabla 4-9).

Tabla 4-8: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 2

Tiempo de reacción (seg)	σ_0		h_0		Número de réplicas		n
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	
0	5,5770	2,3689	1,9957	0,8477	54	10	84
20	6,2814	4,8078	2,2478	1,7205	68	40	98
40	5,6483	4,4515	2,0212	1,5930	55	34	85

Tabla 4-9: Resultados Zona 2

Tiempo de reacción (seg)	Tiempo total de evacuación		Desviación estándar		Intervalo de confianza	
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa
0	219,7560	151,2083	6,9088	2,3596	219,756 $\pm 1,4775$	151,2083 $\pm 0,5046$
20	242,3265	176,3929	7,4061	4,5686	242,3265 $\pm 1,4663$	176,3929 $\pm 0,9045$
40	260,5824	199,0353	5,9401	4,6877	260,5824 $\pm 1,2628$	199,0353 $\pm 0,9966$

Figura 4-8: Zona 2: Segundo piso

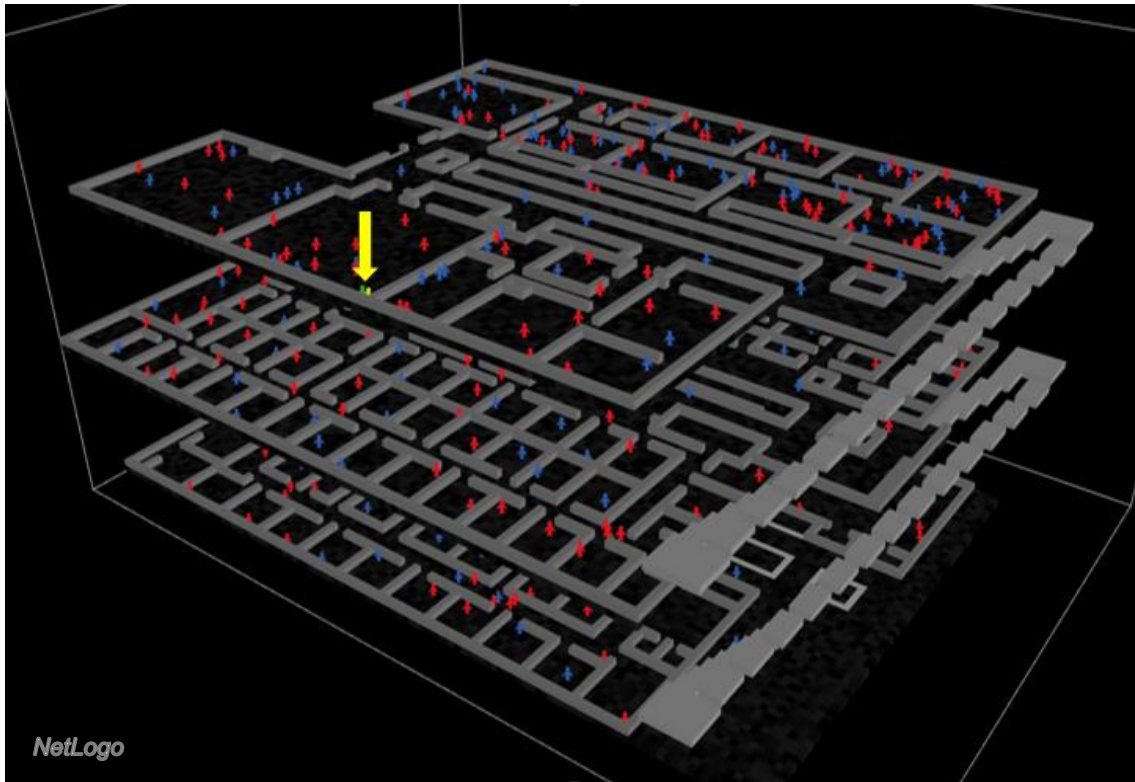
- **Zona 3**

Esta prueba se realizó en el tercer piso del edificio en un área cercana a las escaleras (ver Figura 4-9). En el modelo planteado, se evidenció la tendencia que tienen las personas de bajar por las escaleras, considerando que es el medio más rápido para salir. La Tabla 4-10 presenta los datos requeridos para calcular el tamaño óptimo de réplicas y la Tabla 4-11 resume la información referente al tiempo de evacuación, desviación estándar e intervalos de confianza.

Por tanto, sin depender del tiempo de reacción de los ocupantes de esta zona, es conveniente siempre evacuar por las escaleras, demostrando que la elección de ruta de las personas en el modelo existente es el adecuado.

Tabla 4-10: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 3

Tiempo de reacción (seg)	σ_0		h_0		Número de réplicas		n
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	
0	5,0496	4,0983	1,8070	1,4666	44	29	74
20	9,6922	5,7796	3,4683	2,0682	161	58	191
40	8,5792	2,9405	3,0700	57,0323	126	15	156

Figura 4-9: Zona 3: Segundo piso**Tabla 4-11:** Resultados Zona 3

Tiempo de reacción (seg)	Tiempo total de evacuación		Desviación estándar		Intervalo de confianza	
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa
0	178,0811	302,1757	5,2512	4,1102	178,0811 ± 1,1965	302,1757 ± 0,9365
20	217,3770	316,6440	9,6577	3,7369	217,3770 ± 1,3696	316,6440 ± 0,5299
40	236,7244	336,2083	7,5880	2,7392	236,7244 ± 1,1907	336,2083 ± 0,4298

- **Zona 4**

Inicialmente se identificó la reacción de los ocupantes en dicha zona (ver Figura 4-10), observando que las personas preferían bajar por las rampas, ya que podían acceder a estas de una manera más rápida en comparación con las escaleras. Los resultados de n óptimo y los tiempos finales son presentados en las Tablas 4-12 y 4-13, respectivamente.

Los resultados demuestran que la salida más cercana no necesariamente es la más conveniente, debido a que la distancia de recorrido de las rampas es mucho mayor en comparación con el recorrido que se debe hacer por las escaleras. Por tanto, aunque las personas prefieran escoger las rampas como alternativa de salida, es preferible elegir evacuar por las escaleras, las cuales entregan menores tiempos de evacuación en cada uno de los diferentes tiempos de reacción.

Figura 4-10: Zona 4: tercer piso

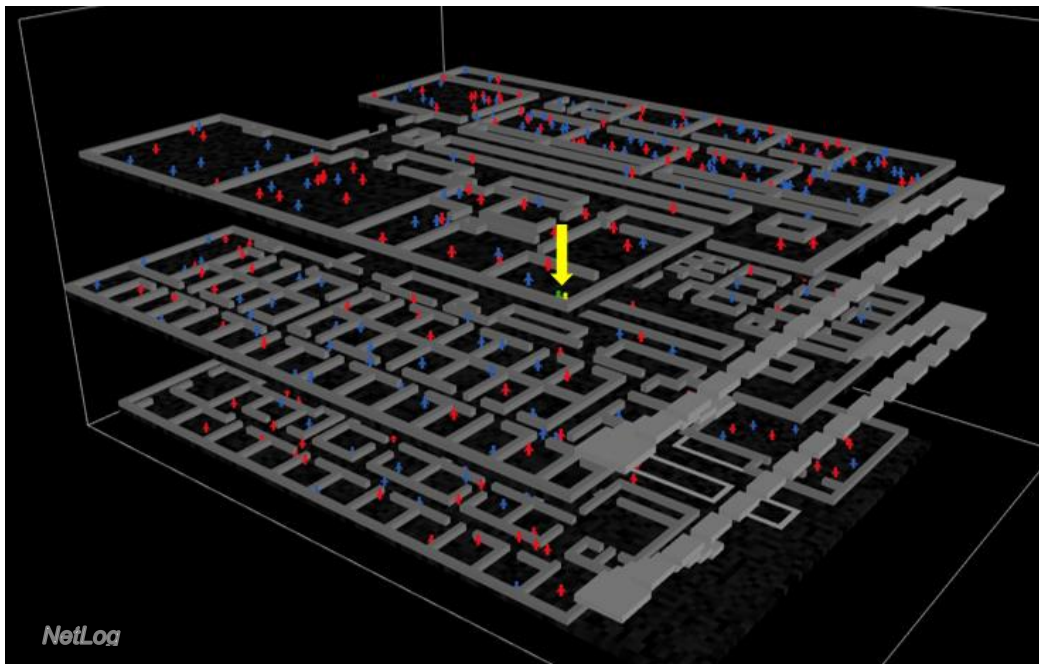


Tabla 4-12: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 4

Tiempo de reacción (seg)	σ_0		h_0		Número de réplicas		n
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	
0	6,4382	4,5875	2,3039	1,6416	71	36	101
20	11,4989	4,7178	4,1148	1,6882	226	39	256
40	8,2493	3,3530	2,9520	38,0019	117	20	147

Tabla 4-13: Resultados Zona 4

Tiempo de reacción (seg)	Tiempo total de evacuación		Desviación estándar		Intervalo de confianza	
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa
0	252,9406	272,0990	7,0581	5,1186	252,9406 ± 1,3765	272,0990 ± 0,9983
20	273,8145	294,7754	10,0421	4,9201	273,8145 ± 1,2301	294,7754 ± 0,6027
40	292,8980	308,7857	8,3391	3,3336	292,8980 ± 1,3480	308,7857 ± 0,5389

- **Zona 5**

Esta última zona se encuentra ubicada en el tercer piso del edificio (ver Figura 4-11). Igual que la zona 4, las personas prefieren bajar por las rampas ya que estas están situadas a una menor distancia. A pesar de esto, los resultados de la Tabla 4-15 evidencian que es recomendable bajar por las escaleras aunque se requiera más tiempo para acceder a estas. Este caso se presenta debido a que la distancia de recorrido de la rampa que comunica los pisos 3-2 y 2-1 es considerablemente mayor comparado con la distancia requerida para bajar por las escaleras.

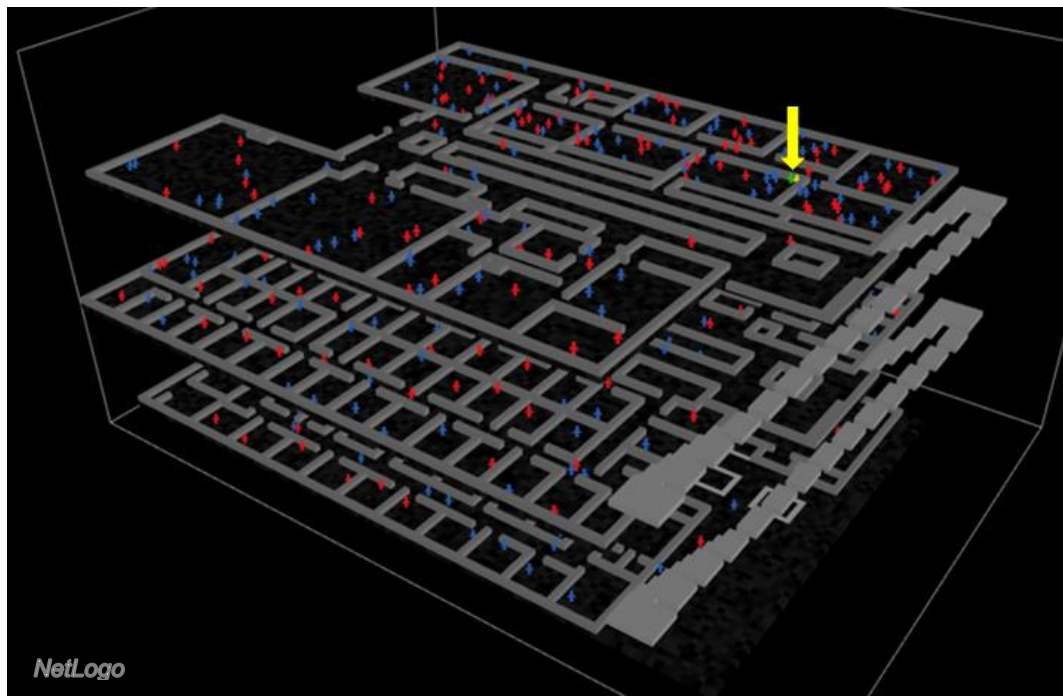
Figura 4-11: Zona 5: tercer piso

Tabla 4-14: Resumen del cálculo del número óptimo de réplicas zona 5

Tiempo de reacción (seg)	σ_0		h_0		Número de réplicas n		n
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	
0	8,1732	3,5451	2,9247	1,2686	115	22	145
20	7,1115	3,7545	2,5448	1,3435	87	25	117
40	8,5729	3,9355	3,0678	24,0682	126	27	156

Tabla 4-15: Resultados Zona 5

Tiempo de reacción (seg)	Tiempo total de evacuación		Desviación estándar		Intervalo de confianza	
	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa	Escalera	Rampa
0	235,8379	243,1724	9,5973	3,8592	235,8379 $\pm 1,5621$	243,1724 $\pm 0,6282$
20	252,9188	264,4145	8,9064	4,9720	252,9188 $\pm 1,6138$	264,4145 $\pm 0,9009$
40	273,1891	287,2500	10,3024	4,3073	273,1891 $\pm 1,6167$	287,2500 $\pm 0,6759$

Estas pruebas permitieron demostrar como el número de personas y los medios de evacuación disponibles impactan el tiempo total de evacuación, verificando si el proceso de elección de ruta de las personas es el adecuado. Los resultados obtenidos se utilizaron para diseñar el nuevo plan de evacuación, guiando a las personas a una respectiva ruta dependiendo su ubicación. En el siguiente capítulo se presentará el diseño del plan de evacuación propuesto teniendo en cuenta los resultados obtenidos en estas pruebas y unos análisis adicionales que se expondrán a continuación.

5. Plan de evacuación propuesto

El diseño actual de los planes de evacuación se fundamentan en la Norma Técnica Colombiana NTC 1700 para cumplir los requisitos mínimos de medidas de seguridad y medios de evacuación; y la norma NTC 1461 que se basa en la señalización requerida en una edificación. A pesar de esto, los planes carecen de flexibilidad por la falta de información y aspectos relevantes que se deben incorporar al momento de la etapa de planeación o diseño.

En este capítulo se presentarán los aspectos que se consideraron para el diseño de un plan de evacuación que tenga que cuenta el comportamiento de las personas, las condiciones de la evacuación y la estructura del edificio.

En una edificación es comúnmente identificar un plano de evacuación explicando cómo se debe actuar y cuáles son las señales convencionales en caso de emergencia. Estos planes muestran que dependiendo de la ubicación de la persona hay una flecha direccional que indica la vía de evacuación hacia donde se encuentra la salida.

El plan propuesto pretende incorporar un componente adicional al utilizar una línea que demarque un límite aceptable de congestión a partir del cual es conveniente cambiar de ruta, es decir, si la congestión llega hasta dicha línea es recomendable tomar la salida alterna. Esta demarcación determina el punto en el cual es mejor cambiar de ruta y a su vez demuestra que existe otra posible ruta de salida. Esta señalización es de gran ayuda en áreas con alta aglomeración de personas, donde es necesario generar un mecanismo de descongestión de la ruta principal (escalera), utilizando así un medio alternativo de salida que brinde menores tiempos de evacuación.

Con el fin de identificar la ubicación de estas demarcaciones, se mostrarán una serie de pruebas variando el número de personas que se encuentran en las salidas, las cuales

buscan acceder a un medio de evacuación. Luego, se presentará el plan de evacuación propuesto con las respectivas comparaciones con el modelo expuesto en el capítulo 3.

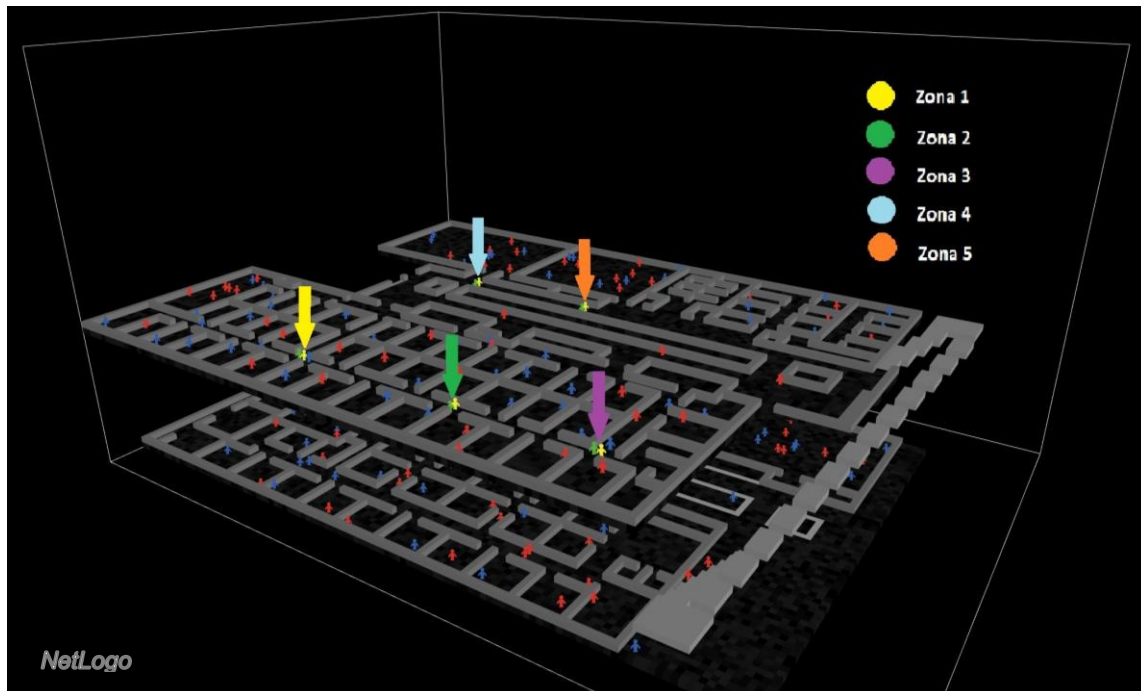
5.1 Diseño del plan de evacuación

A partir del modelo de evacuación que se obtuvo en el Capítulo 3, se realizaron una serie de pruebas con el fin de obtener una señalización adecuada que permita a las personas reaccionar correctamente ante un evento de emergencia, alcanzando menores tiempos de evacuación y disminuyendo el número de personas afectadas. Estas pruebas se realizaron por piso en las zonas donde existen varias alternativas de salida.

5.1.1 Evaluación del proceso de elección de ruta en el piso 2

En la Figura 5-1 se presentan las zonas escogidas para analizar el proceso de salida, identificando nuevas estrategias a considerar en el nuevo plan de evacuación. En cada zona se realizó un análisis de sensibilidad variando el número de personas en las diversas rutas. Por tanto, se evaluará si existe un valor de congestión tal que conlleve a que las personas prefieran cambiar de ruta de evacuación.

Figura 5-1: Análisis de evacuación por zonas (Piso 2)



- **Zona 1**

En esta zona se tienen dos posibles rutas de salida como se observa en la Figura 5-2. Se busca demostrar si generando congestión en la ruta más cercana (ruta 1) se puede generar un cambio de decisión en el agente. En caso de presentarse dicho cambio, se evaluará hasta qué punto es conveniente escoger la salida más corta, disminuyendo el número de personas en la zona hasta obtener un tiempo de evacuación menor por esa ruta.

Figura 5-2: Análisis de la zona 1



Se analizaron los tiempos de evacuación de dos agentes. El agente verde se dirige por la ruta 1, mientras que el agente amarillo evacúa por la ruta 2. Los resultados obtenidos permitieron concluir que es conveniente escoger la ruta 1 sin importar el número de personas en la zona. Esto se debe a que el agente logró salir por la ruta 1 en un tiempo de 79 segundos, en comparación con la ruta 2, la cual presentó un tiempo de evacuación de 83 segundos.

- **Zona 2**

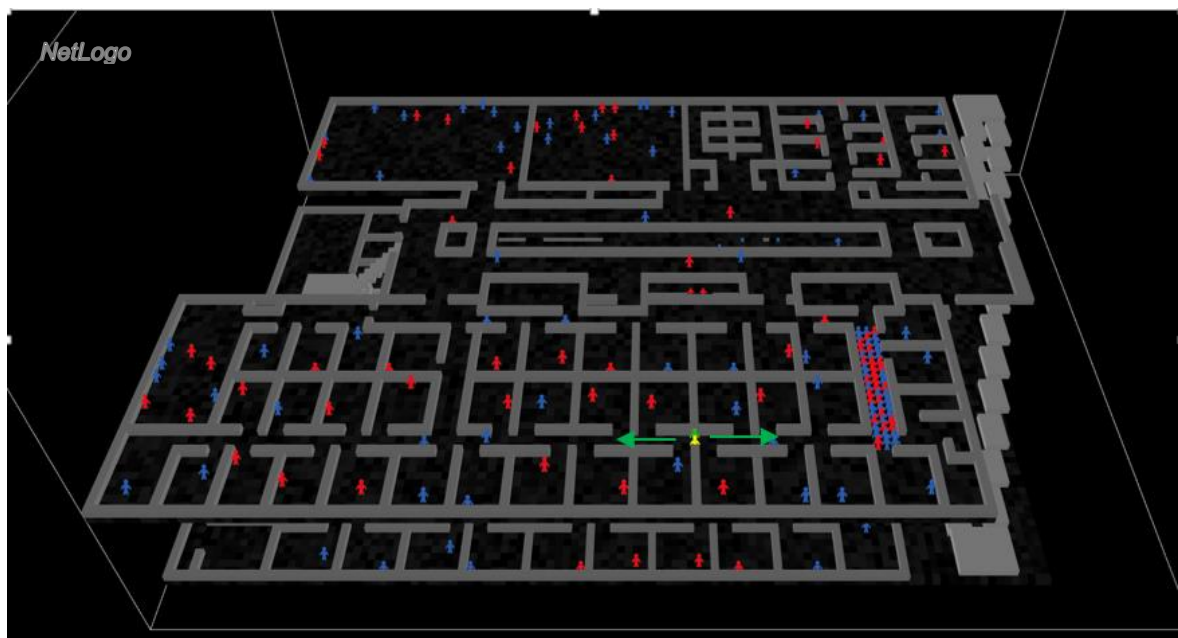
Las personas que se encuentran en esta zona deben elegir la ruta 1 (sentido izquierdo) o la ruta 2 (sentido derecho). En esta zona se hicieron dos experimentos. El primero consiste en ubicar a las personas en todo el pasillo de la ruta 2, con el fin de verificar si es mejor cambiar de elección considerando la alta congestión en la salida (ver Figura 5-3). De igual

manera se realizó el experimento para la ruta 1, ubicando a las personas en esa zona y evaluando si es mejor escoger la salida con menor densidad de personas. La Tabla 5-1 presenta los resultados de los dos experimentos, identificando que los tiempos observados para salir por las rutas con mayor densidad son muy similares. Por tanto, se concluye que para esta zona es recomendable seguir con el modelo de evacuación planteado, incorporando la densidad y la distancia como factores determinantes para la elección de ruta.

Tabla 5-1: Experimentos zona 2

Tiempo de Evacuación (seg)	Ruta 1	Ruta 2
Experimento 1	74	54
Experimento 2	51	78

Figura 5-3: Análisis de la zona 2

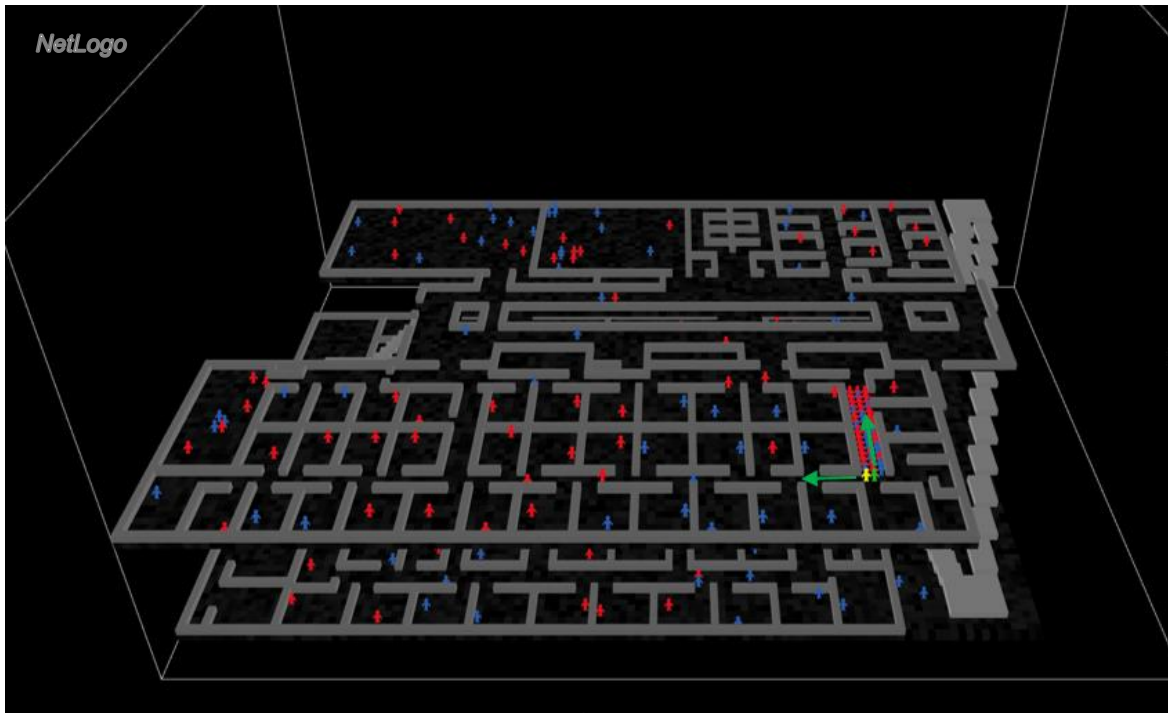


- **Zona 3**

Esta prueba analiza cual salida es la más adecuada considerando que la ruta 2 se encuentra completamente congestionada (ver Figura 5-4). Se busca identificar la ubicación de la línea que demarca el límite a partir del cual es mejor cambiar de ruta. Los dos agentes

se encuentran situados en las coordenadas (x,y,z) igual a $(87,10,24)$ y $(88,10,24)$. Inicialmente, la zona 3 se encuentra congestionada desde $y = 11$ hasta $y = 26$.

Figura 5-4: Análisis de la zona 3



Primeramente se verificó si es adecuado escoger la ruta 2 a pesar de contar con una alta densidad de personas. En caso que no sea recomendable, se evaluarían los tiempos de evacuación disminuyendo la congestión al aumentar en dos unidades la coordenada y desde $y = 11$.

La Tabla 5-2 presenta los resultados de la prueba, identificando que para una congestión hasta $y = 11$ es necesario cambiar de alternativa de salida, y por tanto escoger la ruta 1. Luego se probó disminuyendo el número de personas con y igual a 13, 15 y 17. La última prueba con $y = 17$ entregó un tiempo menor para la ruta 2, demostrando que con una cantidad de personas que llegue hasta esa coordenada es recomendable salir por esa ruta. Para ubicar la línea de señalización se evaluó la congestión hasta $y = 16$ y se obtuvo un menor tiempo para la ruta 2. Esto permite concluir que la línea requerida para señalar el límite de aceptación de personas se ubicará en el pasillo de esta zona específicamente en $y = 16$.

Tabla 5-2: Tiempo de evacuación vs congestión (zona 3)

Tiempo de Evacuación (seg)		
Coordenada y	Ruta1	Ruta 2
11	71	93
13	71	79
15	71	76
16	71	64
17	71	61

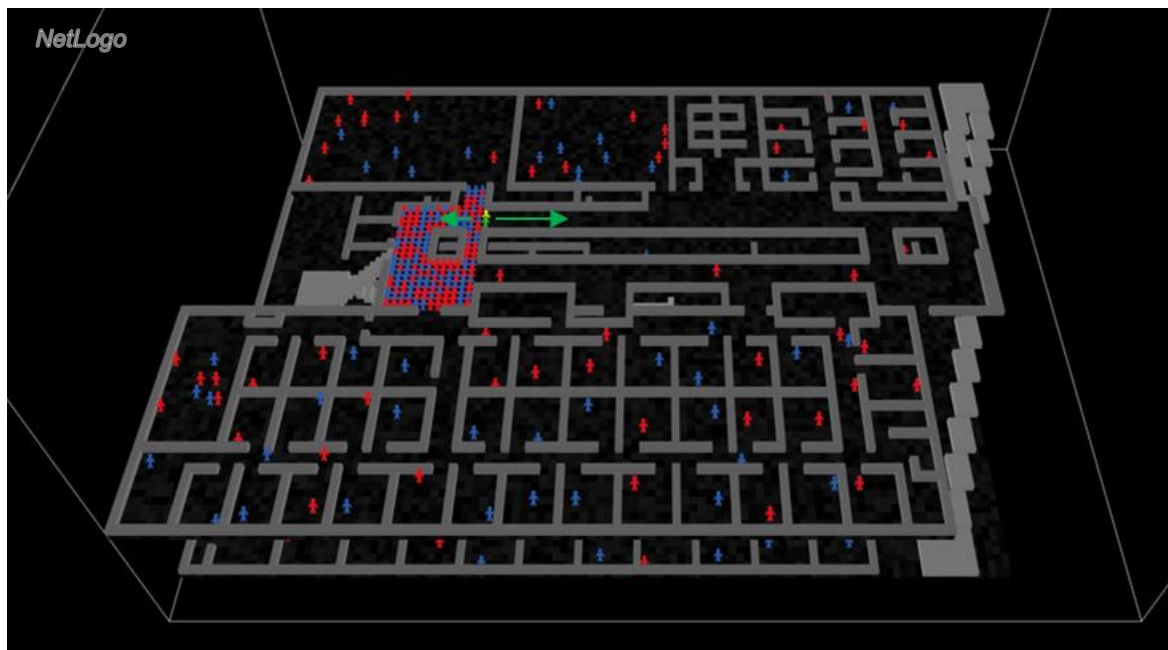
- **Zona 4**

Las personas que se encuentran ubicadas en esta zona evalúan la decisión de evacuar por las rampas o por las escaleras; estas últimas se localizan más cerca de los agentes (ver Figura 5-5). En esta prueba al contrario de las otras, inició con el análisis del número de personas con una congestión mínima y se fue aumentando hasta obtener resultados de un menor tiempo de evacuación por las rampas.

Los dos agentes de prueba se ubicaron en las coordenadas (39,48,24) y (39,49,24) respectivamente. En esta instancia un agente decide bajar por las escaleras, mientras que el otro prefiere evacuar por las rampas. Se generó mayor congestión al aumentar la coordenada x del modelo, modificando el número de personas en la zona. La Tabla 5-3 presenta los datos obtenidos al ejecutar el modelo variando la cantidad de personas para acceder por las escaleras. De acuerdo a los datos obtenidos, la línea de señalización debe ubicarse en $x = 31$. Por tanto, en caso de presentarse una congestión tal que ocupe toda la zona hasta dicha demarcación, es recomendable cambiar de ruta de salida debido a que no hay capacidad para acceder a las escaleras por el alto tiempo de evacuación que se obtendría.

Tabla 5-3: Tiempo de evacuación vs congestión (zona 4)

Tiempo de Evacuación (seg)		
Coordenada x	Ruta1	Ruta 2
27	137,5	176,5
28	145,5	179,5
29	157,5	175,5
30	161	185,5
31	183	184,5
32	187,5	179

Figura 5-5: Análisis de la zona 4

- **Zona 5**

En esta zona intermedia entre las escaleras y rampas se analizó cual es la opción más conveniente considerando la congestión que se puede presentar (ver Figura 5-6). La opción 1 considera como salida de emergencia las escaleras, mientras que por la opción 2, la persona elige las rampas como medio de evacuación. Se busca determinar la ubicación de la línea de señalización que indica la capacidad máxima de personas que esperan acceder a las escaleras. Estas personas que se encuentran en fila de espera

consideran que las escaleras es mejor opción de salida ya que entregan menores tiempos de evacuación. Por tanto, se quiere obtener una ubicación específica a partir de la cual es conveniente salir por las rampas ya que esperar en la fila genera mayores tiempos de evacuación.

Los dos agentes de prueba se ubicaron en las coordenadas (61,48, 24) y (61,49,24), iniciando con una congestión máxima desde $x = 27$ hasta $x = 60$. Se realizaron las pruebas con x igual a 60, 50, 40 y 30. Los resultados de la Tabla 5-4 presentan que dichos valores se traducen en un menor tiempo de evacuación por las rampas. Luego se realizó el experimento con $x = 28$, $x = 27$ y sin ningún agente por esta zona. Los resultados fueron similares, concluyendo que las personas que se encuentren ubicadas en esta zona es conveniente evacuar siempre por las rampas sin considerar la densidad en las zonas cercanas a la salida.

Figura 5-6: Análisis de la zona 5

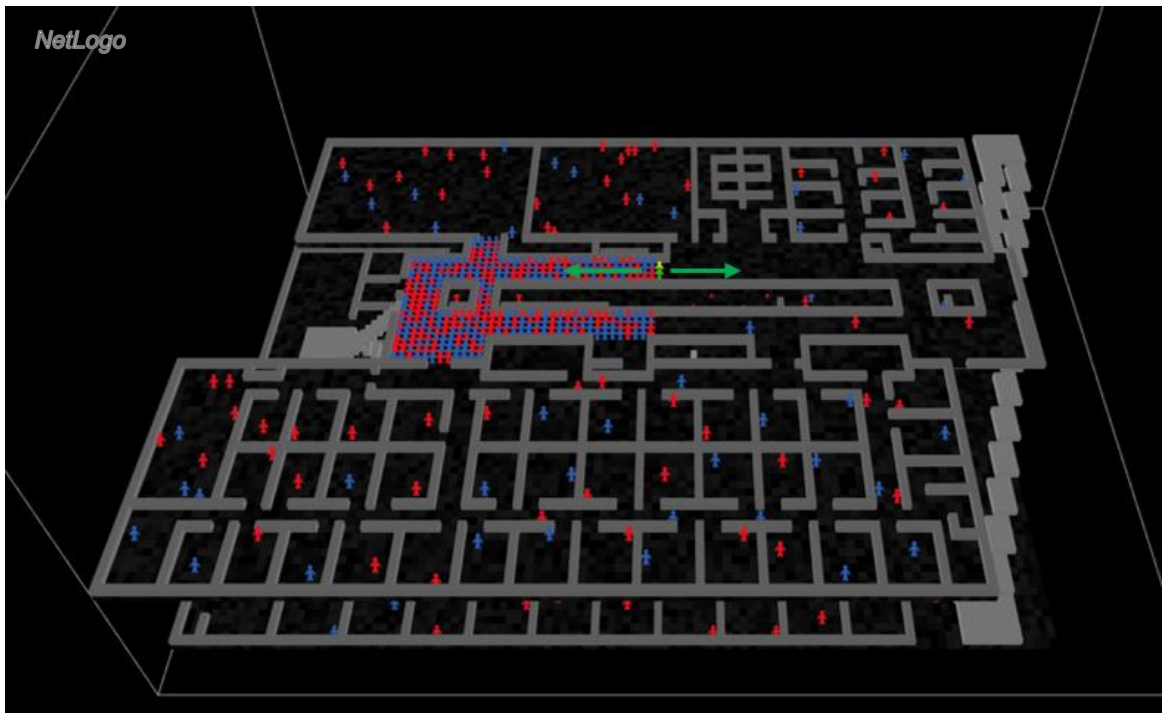


Tabla 5-4: Tiempo de evacuación vs congestión (zona 5)

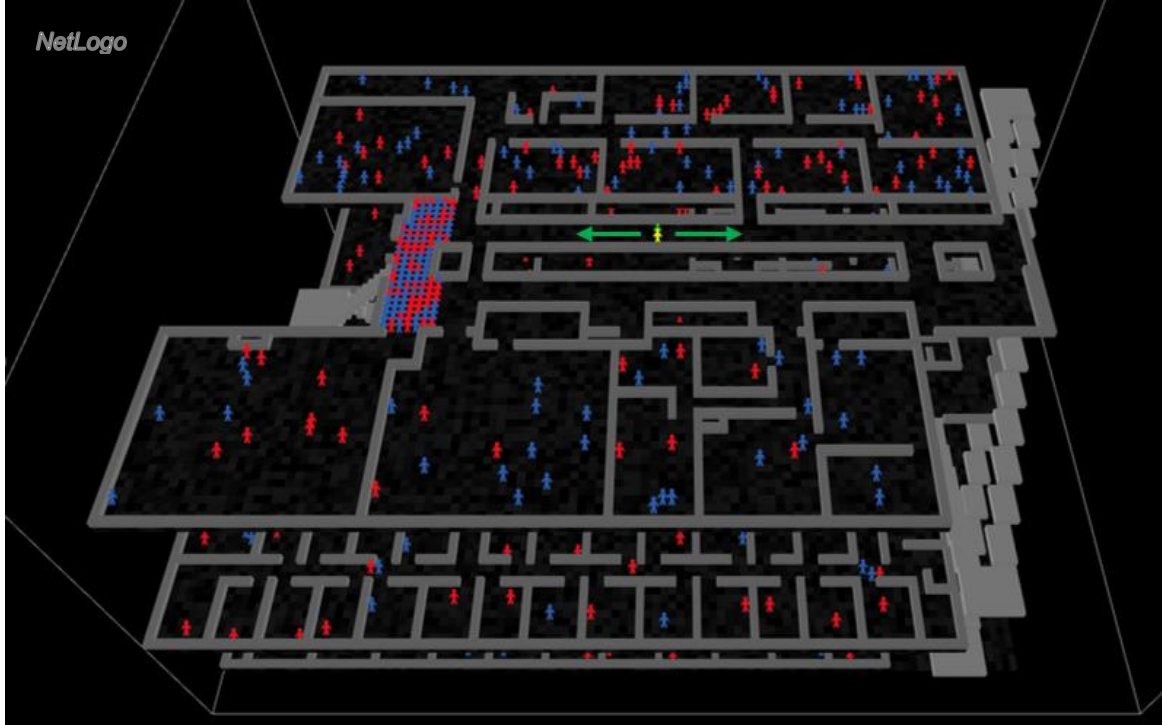
Tiempo de Evacuación (seg)		
Coordenada x	Ruta1	Ruta 2
60	296	160,5
50	267,5	156,5
40	238	157,5
30	203,5	154,5
28	172,5	156,5
27	164,5	153,5
Sin congestión	158,5	151,5

5.1.2 Evaluación del proceso de elección de ruta en el piso 3

En el tercer piso del edificio se identificó una zona donde se evalúa la decisión de los agentes para escoger entre rampas o escaleras (ver Figura 5-7). La Tabla 5-5 presenta los resultados del experimento, identificando que la línea de señalización debe localizarse en la coordenada $x = 33$. Si una persona de esta zona identifica que la congestión en las escaleras sobrepasa la demarcación, es recomendable escoger la ruta contraria, obteniendo como resultado un tiempo de evacuación menor.

Tabla 5-5: Tiempo de evacuación vs congestión

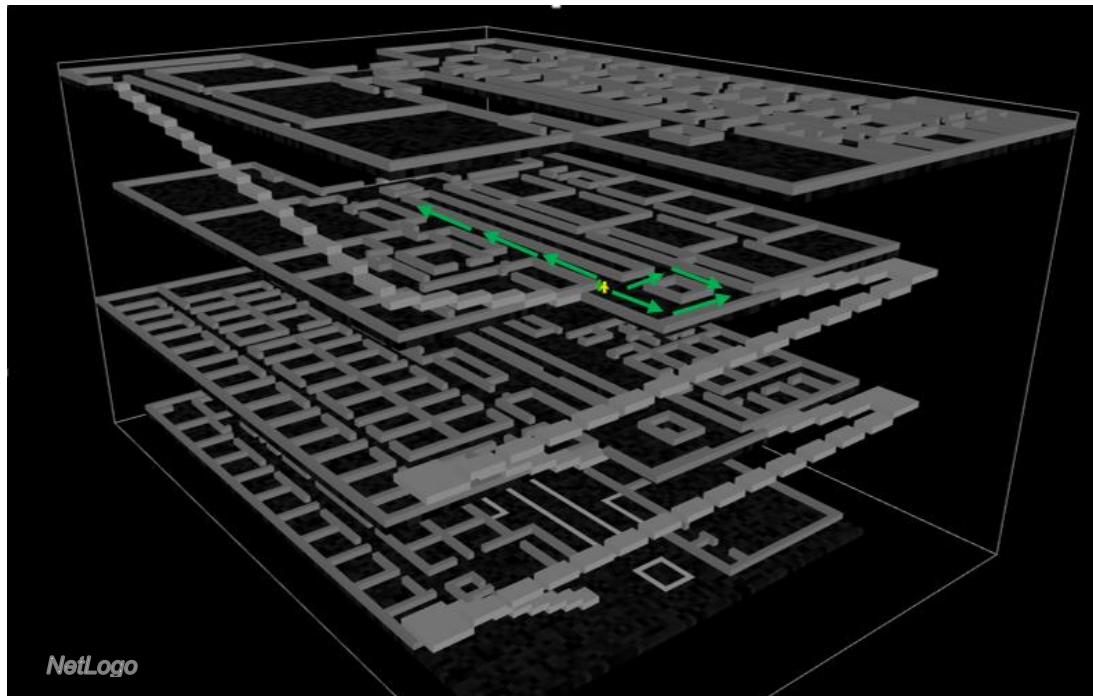
Tiempo de Evacuación (seg)		
Coordenada x	Ruta1	Ruta 2
60	465	242,5
50	482	236,5
40	354,5	237,5
30*	218	232,5
31	239	234,5
32	228,5	230,5
33	224	230,5
34	255	231,5
35	246,5	234,5

Figura 5-7: Análisis de la zona 6

5.1.3 Evaluación del proceso de elección de ruta en el piso 4

En este piso existen dos medios de evacuación disponibles, pero no todas las personas de la zona pueden acceder a estos. La zona superior solo puede acceder a las escaleras, mientras que la zona inferior puede bajar únicamente por las rampas.

Toda persona que baje por las escaleras debe seguir en este medio de evacuación, ya que cambiar de ruta generará un aumento de tiempo de salida debido a la larga distancia de recorrido que deben caminar las personas en caso de escoger las rampas. Por otro lado, las personas que están en el cuarto piso y bajan por las rampas deben analizar cuál es la ruta más conveniente, verificando tanto distancia como densidad de personas, y como estas dos variables se traducen en un menor tiempo de evacuación (ver Figura 5-8).

Figura 5-8: Elección de ruta en el tercer piso

La Tabla 5-6 presenta los datos requeridos para obtener el número óptimo de réplicas y el resultado de tiempo de evacuación dependiendo el medio de salida. Se consideró un $n_0 = 30$ y un nivel de confianza del 95%. Por consiguiente, el valor de n óptimo es igual 86 réplicas incluyendo las muestras iniciales. En conclusión, es recomendable que todas las personas evacuen por las escaleras, generando que salgan más rápido del edificio.

Tabla 5-6: Resumen de resultados prueba cuarto piso

Medio de evacuación	σ_0	h_0	n	Tiempo de evacuación (seg)
Escaleras	5,72153122	2,04742365	56	208,517442
Rampas	3,35778389	1,20156753	20	210,569767

5.1.4 Cambio en la infraestructura del edificio

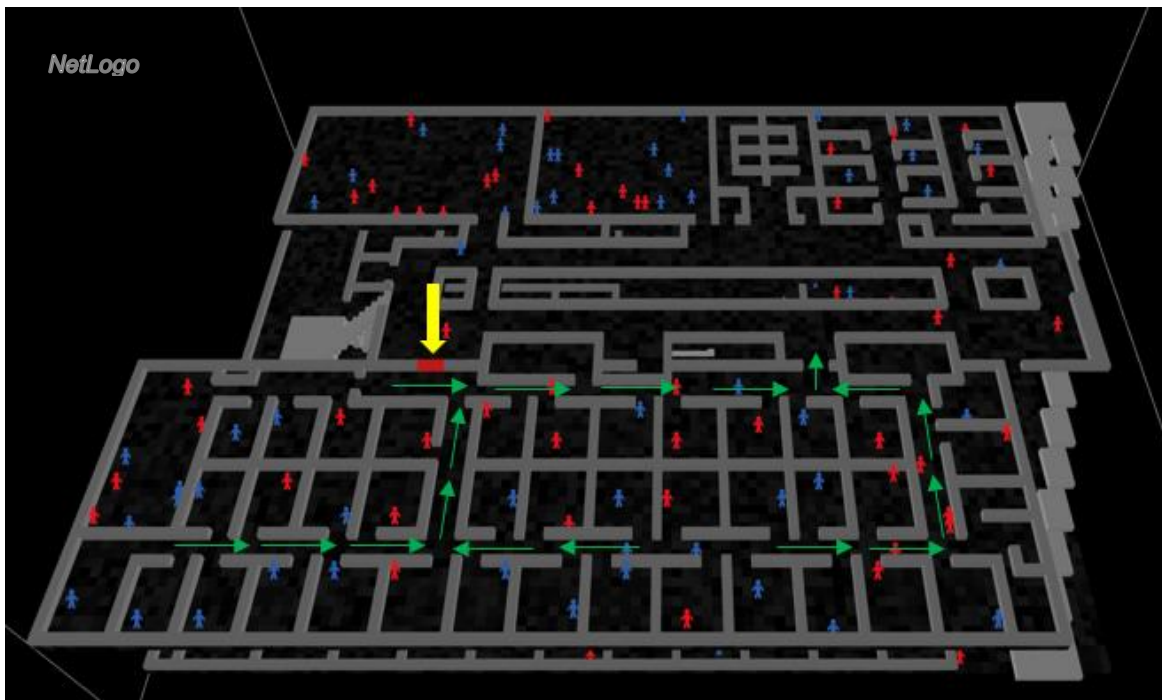
En esta sección se presentan dos modificaciones en el diseño del edificio. La primera hace referencia al bloqueo en una puerta de salida principal que comunica la zona inferior del segundo piso con las escaleras. Como segunda modificación se presenta la creación de dos puertas de salida para dos salones que se encuentran ubicados en la zona inferior del cuarto piso, habilitando la evacuación directa de las personas por las escaleras. Estos

cambios se realizaron con el objetivo de verificar la importancia que tiene la etapa de diseño de un edificio, evidenciando la necesidad de analizar si la estructura de un recinto permite al usuario obtener un plan de evacuación efectivo antes diversos eventos de emergencia.

- **Bloqueo de la puerta salida, segundo piso**

En la Figura 5-9 se identifica la puerta que se encuentra bloqueada, siendo esta el medio de evacuación que direcciona a las personas hacia las escaleras. Al bloquear la salida genera que las personas de la zona inferior de este piso requieran salir por la puerta alterna, y así poder elegir entre rampa o escalera con el fin de evacuar del edificio y llegar a una zona segura.

Figura 5-9: Bloqueo puerta segundo piso



El resumen de los resultados de tiempo de evacuación se presenta en la Tabla 5-7, detallando como primera medida el cálculo para hallar el tamaño óptimo de réplicas. Para esto se consideró un $n_0 = 30$, un nivel de confianza del 95% y un $h_e = 1,5$ segundos. Por tanto, se concluye que al inhabilitar esta salida no se ve afectado el tiempo de evacuación, y por el contrario, se evidenció una disminución de 1,46 segundos en comparación con el

plan existente. Esto se genera debido a la congestión que se presenta en las escaleras, disminuyendo este índice al direccionar a las personas que se encuentran en la zona inferior a bajar por las rampas. Por tanto, se recomienda determinar esta puerta como la salida de emergencia principal, disminuyendo la congestión por las escaleras y guiando a las personas a seleccionar las rampas como medio de evacuación. Adicionalmente, es importante identificar la importancia de contar con mínimo dos rutas de salida, ya que en caso de encontrar inhabilitado una de estas se pueda acceder a la salida alterna, evacuando a todas las personas que están localizadas en esta zona.

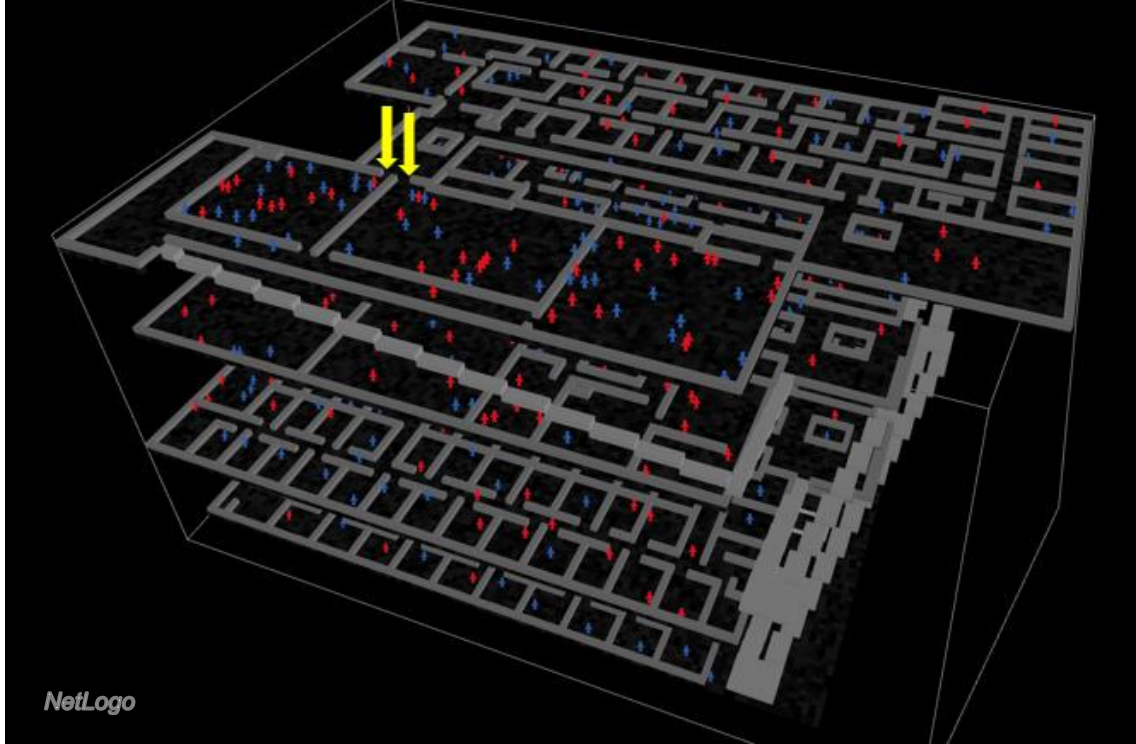
Tabla 5-7: Tiempo de evacuación al bloquear puerta en el segundo piso

σ_0	8,4718
h_0	2,9823
n	153
Tiempo de evacuación (seg)	403,1557
σ	8,1927
Intervalo de confianza	403,1557 \pm 1,2982

- **Habilitar puertas de salida, cuarto piso**

Esta modificación se desarrolló con el fin de verificar el impacto que tiene el diseño de una edificación en el proceso de evacuación y en sus variables de salida. La prueba se realizó en el cuarto piso al identificar una posible ruta de evacuación que se podría adicionar siendo esta la zona más vulnerable en caso de una emergencia debido a que se encuentra más lejos para acceder a la salida final. Adicionalmente, esta zona inferior presenta un inconveniente de diseño ya que cuenta con una única salida de emergencia, siendo esta la rampa que comunica los pisos 3 y 4. Por tanto, en un evento inesperado se puede generar el bloqueo para acceder a la rampa, conllevando a que todas las personas que se encuentran en esta zona se vean afectadas por no poder evacuar del edificio.

Para esto se habilitaron dos puertas como lo muestra la Figura 5-10. En la simulación las personas que se ubican en estas dos zonas deben elegir dicha salida de emergencia, cambiando las rampas por las escaleras como medio de evacuación. Se recomienda contar con estas dos posibles rutas y así poder escoger una estrategia alterna en caso que la ruta principal se encuentre bloqueada.

Figura 5-10: Habilitar puertas en el cuarto piso

La simulación con esta modificación presentó un tiempo total de evacuación considerablemente menor en comparación con el plan existente, obteniendo una disminución de 28,73 segundos, es decir, un porcentaje de disminución del 7,1%. Este resultado demuestra la ventaja de habilitar estas dos salidas de emergencia mejorando el proceso de evacuación al incluir esta variante en el plan existente.

Tabla 5-8: Tiempo de evacuación al habilitar puertas en el cuarto piso

σ_0	9,3218
h_0	3,2815
n	178
Tiempo de evacuación (seg)	375,8867
σ	9,6691
Intervalo de confianza	$375,8867 \pm 1,4205$

5.2 Descripción del plan de evacuación propuesto

Las pruebas que se realizaron al modificar el modelo existente permitieron obtener un plan de evacuación que incorpore el comportamiento de las personas y como estas conductas impactan la elección de ruta ante una emergencia. Este plan brinda instrucciones claras y sencillas de cómo deben reaccionar las personas y cuáles son las decisiones que deben tomar considerando tanto el número de personas en una zona de salida, como la distancia que deben recorrer para acceder a un medio de evacuación.

Se presenta el plano de evacuación por piso, en el cual se observan las características y requisitos de los planes actuales, y la incorporación de la propuesta de una línea de señalización que sea clara y visible para el usuario. Esta señal de seguridad brinda al usuario un mensaje que se obtiene de un color particular que llama la atención e informa acerca de una condición de seguridad. Por tanto, el color designado para la señal de seguridad y según la norma NTC 1461 (ICONTEC., 2004) es el verde, indicando a los usuarios hasta qué punto es conveniente una salida de emergencia. Para efectos de visualización, el color rojo presentado en los planos de evacuación representa las líneas de señalización propuestas. El primer piso no requirió de un análisis de rutas debido a que solo existe la salida final que conduce a la zona segura. Por tanto, el plano de evacuación existente del piso 1 se presenta en la Figura 5-11.

En la Figura 5-12 se observa el plano de evacuación del segundo piso, identificando la nueva señal de seguridad a una distancia de 2 metros de las escaleras. Esta demarcación se debe visualizar fácilmente y a largas distancias. Adicionalmente, la línea que se encuentra en el pasillo interno de la zona inferior del segundo piso está ubicada a 3,2 metros desde donde inicia el pasillo. Este nuevo plan recomienda como salida principal de la zona inferior del piso 2 la puerta que se encuentra más cercana a las rampas. Por tanto, la puerta que se encuentra cerca de escaleras debe considerarse como ruta alterna en caso que la otra salida se encuentre inhabilitada. Esta estrategia evidencia la necesidad de contar como mínimo con dos salidas de emergencia, para que en caso que la ruta principal se encuentre bloqueada se pueda escoger la ruta alterna a pesar que entregue un mayor tiempo de evacuación.

Figura 5-11: Plano de evacuación, piso 1

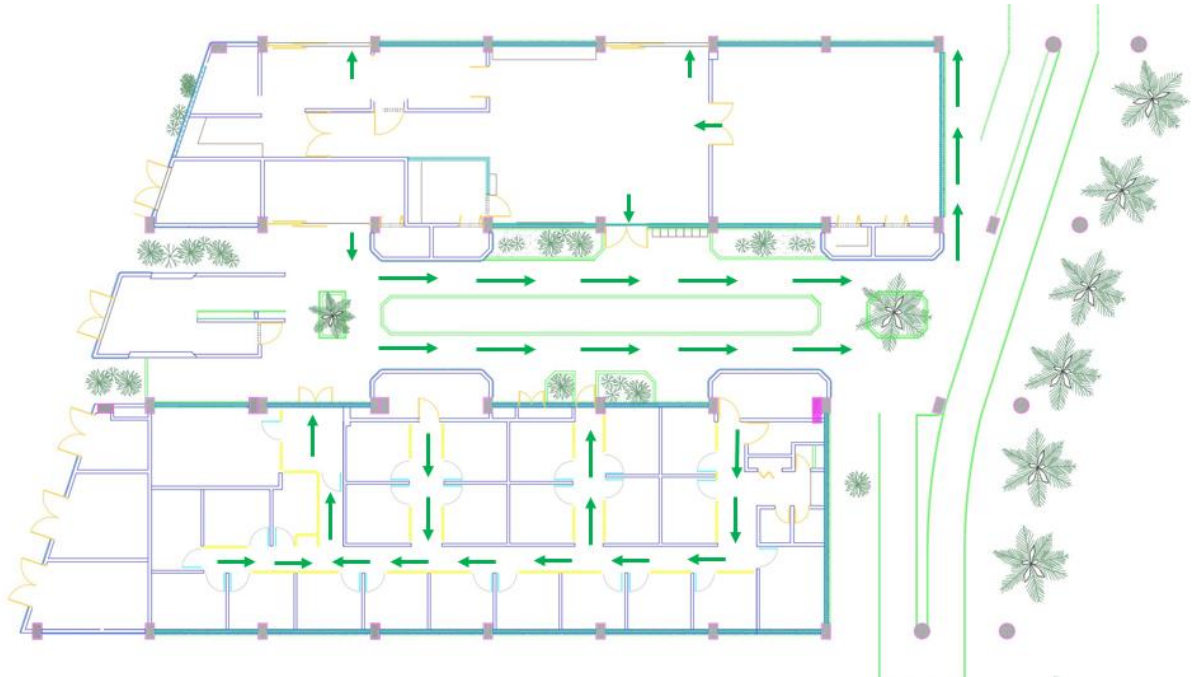
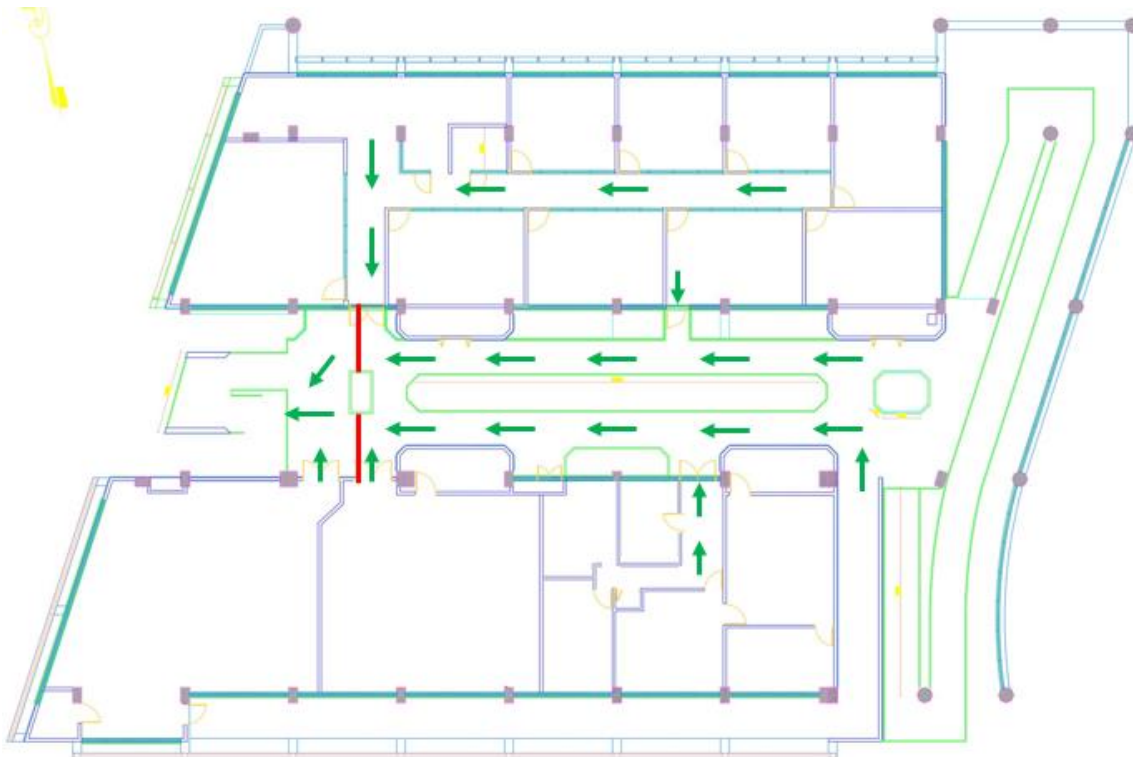


Figura 5-12: Plano de evacuación, piso 2

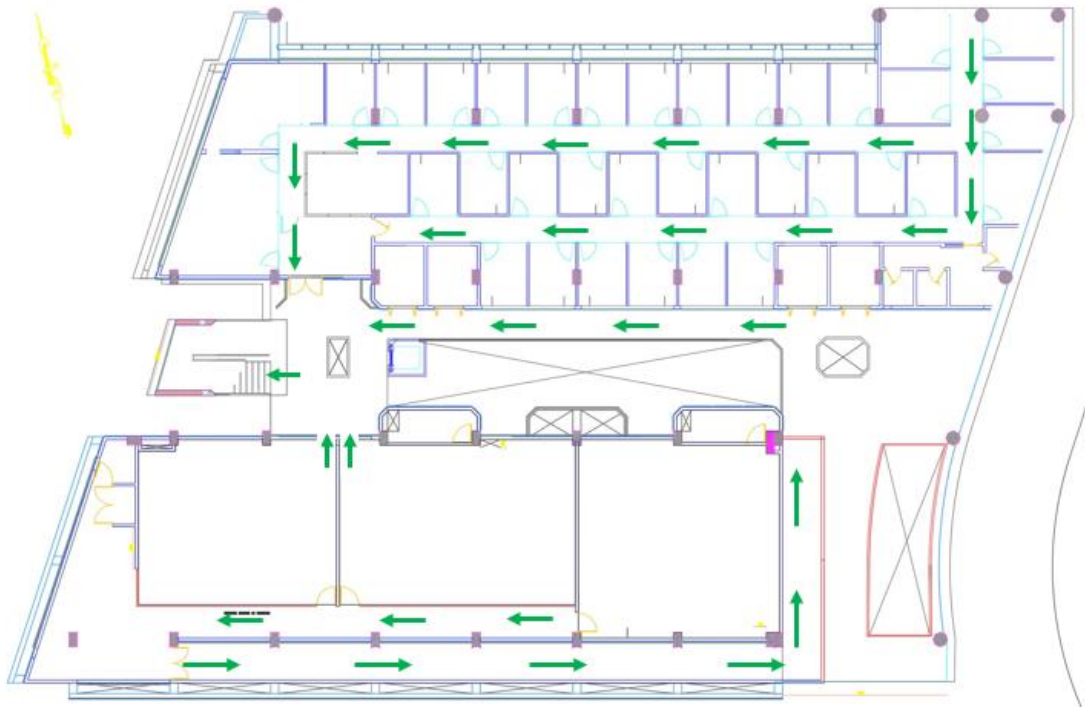


En cuanto al plano del tercer piso, la señal de seguridad se ubicó a 2,8 metros de las escaleras. Se debe adicionar una señal que indique la salida de emergencia y la dirección que deben seguir las personas que bajan por las rampas del cuarto al tercer piso. En otras palabras, estas personas al momento de llegar al tercer piso deben identificar con facilidad la ruta de salida recomendada, eligiendo evacuar por las escaleras a pesar de encontrarse más cerca de las rampas (ver Figura 5-13).

Figura 5-13: Plano de evacuación, piso 3



La Figura 5-14 presenta el plan de evacuación del cuarto piso, identificando las rutas de salida de acuerdo al plan existente. En este piso se identificó la necesidad de habilitar otras salidas de emergencia para las personas que se encuentran en la zona inferior. Por tanto, se recomienda un cambio en la estructura del edificio, el cual no representa un costo significativo a la institución, pero si se traduce en una mejora considerable y significativa para las personas que se desplazan por esta zona. Al habilitar estas dos salidas se disminuye considerablemente el tiempo de evacuación y el número de personas afectadas, generando una estrategia de evacuación conveniente. Por tanto, los resultados del plan propuesto se presentarán en la siguiente sección.

Figura 5-14: Plano de evacuación, piso 4

- **Resultados del plan de evacuación propuesto y comparaciones con el modelo existente**

Se modificó el modelo base considerando todos los aspectos que incorpora el nuevo plan de evacuación. A partir de esto se analizó el desempeño de la evacuación verificando el tiempo total de salida y el número de personas afectadas. Para obtener el tiempo de evacuación se consideró un $n_0 = 30$ y un nivel de confianza del 95%. La Tabla 5-9 presenta los datos requeridos para calcular el n óptimo, obteniendo un valor final de 225 réplicas al incluir las muestras iniciales. Se ubicaron 500 personas en distintas zonas concurridas del edificio y se definieron sus atributos y variables.

Tabla 5-9: Tiempo de evacuación según el plan propuesto

σ_0	10,6974
h_0	3,7658
n	225
Tiempo de evacuación (seg)	372,2088
σ	9,4113
Intervalo de confianza	$372,2088 \pm 1,3382$

Al evaluar los dos modelos de evacuación se evidenció un menor tiempo de salida empleando el plan de evacuación propuesto que con los planes que se implementan actualmente (ver Tabla 5-10). Por tanto, las personas en promedio pueden evacuar del edificio en 6 minutos con 12 segundos teniendo en cuenta el plan propuesto mientras que, esa misma cantidad de personas pueden evacuar del edificio de acuerdo al plan existente en un tiempo de 6 minutos y 45 segundos. Estos resultados se traducen en 33 segundos, es decir, una disminución del 8% en el tiempo total de evacuación de edificio.

Tabla 5-10: Tiempos de evacuación según plan existente y plan propuesto

Tiempo total de evacuación (seg)	
Plan existente	Plan propuesto
404,6139	372,2088

En cuanto al número de afectados, la Tabla 5-11 presenta el resumen de los cálculos realizados para obtener el tamaño de muestra óptimo final y el número de evacuados. Por tanto, el valor n es igual a 190 réplicas, incluyendo las 30 iniciales. Esta simulación se desarrolló con un total de 500 personas en el edificio y se consideró un nivel de confianza del 95% y un $h_e = 1$.

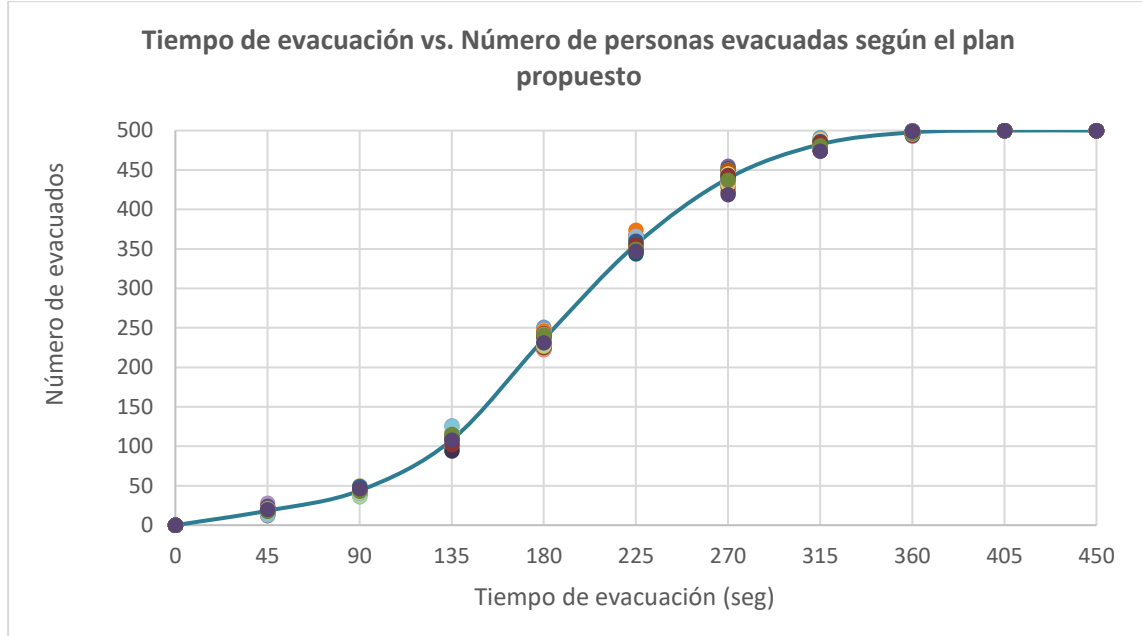
Tabla 5-11: Número de evacuados según el plan propuesto

Tiempo de evacuación (seg)	45	90	135	180	225	270	315	360	405	450
σ_0	2,2675	2,7975	5,7293	6,4622	5,9248	6,2294	3,7772	1,4274	0	0
h_0	0,4422	0,5456	1,1174	1,2603	1,1555	1,2149	0,7367	0,2784	0	0
n	20	30	126	160	135	149	55	8	0	0
Número de evacuados	18	44	108	236	356	439	483	498	500	500

De igual manera que el modelo presentado en el capítulo 4, la Figura 5-15 ilustra el proceso de salida de 500 personas considerando el plan propuesto. Se identificó que entre los 135 y 180 segundos se presenta una mayor tasa de salida de personas del edificio. Después de los 180 segundos se presentó una disminución en la pendiente de la curva, generando una menor cantidad de evacuados con respecto al tiempo. Esta situación se presenta

debido a que al aumentar el tiempo de evacuación, el número de personas en el edificio va disminuyendo hasta llegar a 0, es decir, hasta evacuar por completo el lugar.

Figura 5-15: Número de evacuados según el plan propuesto



Para finalizar, se presenta la comparación entre el plan existente y el plan propuesto en relación al número de personas afectadas. Al analizar los resultados de la Tabla 5-11 se observa que el plan propuesto entrega una mayor cantidad de evacuados, y por tanto, una menor cantidad de afectados en comparación con el plan existente. Esta diferencia se observa en el segundo 270 al aumentar en un valor de 6 el número personas evacuadas, es decir, una disminución de 6 en el número de afectados. Para las instancias de tiempo de 315 y 360, se observó una disminución de personas afectadas de 10 y 6, respectivamente. Para las instancias de 90, 180 y 405 segundos, se presentó un aumento de una persona que logra salir del edificio. Finalmente, para los otros valores de análisis no se identificó una variación significativa en el número de personas evacuadas.

Tabla 5-12: Número de evacuados según el plan de evacuación

Tiempo de evacuación (seg)	45	90	135	180	225	270	315	360	405	450
Plan existente	18	43	108	235	356	433	473	492	499	500
Plan propuesto	18	44	108	236	356	439	483	498	500	500

A partir de esta información se puede concluir que el plan de evacuación propuesto entrega mejores resultados de tiempo total de evacuación y número de personas afectadas. Esta afirmación demuestra la importancia de evaluar el diseño de las edificaciones, identificando y verificando el proceso de evacuación al considerar las conductas y las reacciones de las personas en condiciones de emergencia.

6. Conclusiones

Esta investigación tuvo como objetivo el diseño de planes de evacuación ante emergencias considerando modelos microscópicos de simulación para recrear el comportamiento de las personas ante una evacuación de una edificación. Los planes de evacuación actuales se fundamentan en la norma técnica colombiana de higiene y seguridad (2004), entregando al usuario una única ruta de salida de la edificación en donde se generó la emergencia. Sin embargo, estos planes son limitados al representar las condiciones que se presentan en una emergencia real, pues ignoran el comportamiento dinámico que pueden tener las personas ante diversas condiciones de peligro, el cual es algunas veces influenciado por las mismas condiciones de la infraestructura.

A pesar que en la literatura se encuentran varios estudios acerca de la evacuación de multitudes, no se encontró evidencia en donde consideren como aspecto fundamental del desempeño de una evacuación de edificios o grandes estructuras, la influencia del diseño arquitectónico del lugar, de las condiciones del entorno y el comportamiento de las personas. En esta investigación se planteó un modelo de simulación de evacuaciones que incorpora la reacción de las personas ante una emergencia. Específicamente, se implementó un modelo de simulación basado en agentes incorporando una componente de elección discreta. Este modelo se calibró con base en un simulacro de evacuación que se realizó en un salón magistral de la Universidad del Norte.

A pesar de que los simulacros pueden no lograr alterar los patrones de comportamiento de las personas por la ausencia de una emergencia real, son útiles en los procesos de calibración de los modelos de simulación. Debido a la influencia en el comportamiento de las personas y en el desempeño de la evacuación, el modelo incluyó los siguientes factores: género, velocidad, distancia, densidad, tiempo de reacción, elección de ruta y presencia de obstáculos. A partir de los datos obtenidos en el simulacro se determinó estadísticamente mediante un análisis de diferencia de medias que la velocidad de

evacuación depende del género del agente. Es decir, el modelo considera que las velocidades varían entre hombres y mujeres. Además, los tiempos de reacción se consideraron diferentes entre agentes.

Para representar la decisión de la persona cuando existen múltiples rutas de salida, se calibró un modelo logit multinomial en función de la distancia de recorrido y la densidad de personas en las zonas de salida. Con el fin de que la simulación represente adecuadamente lo observado en el simulacro, se estimaron factores de ajuste para la velocidad y el tiempo de reacción. Se encontró que un aumento de un 30% en los valores de los parámetros de la velocidad, y una disminución de un 5% en los parámetros del tiempo de reacción permiten obtener un valor cercano al tiempo real de evacuación observado.

El modelo calibrado se aplicó a una evacuación de un edificio, el cual cuenta con rampas y escaleras como medios de evacuación. Esta simulación entregó un tiempo total de evacuación de $404,6139 \pm 1,2693$ segundos. Con relación al número de personas evacuadas, se identificó que entre los 135 y 180 segundos se presentó la mayor tasa de salida de personas del edificio. A partir de los 180 segundos se evidenció una disminución en la pendiente de la curva, y por tanto, una disminución en el número de personas evacuadas con respecto al tiempo.

Se evaluaron distintos escenarios de evacuación del edificio para medir como las alternativas de evacuación, el número de personas y la elección de ruta del agente puede afectar el desempeño de la evacuación. Las pruebas permitieron concluir que el edificio Julio Muvdi debe contar con la disponibilidad de las escaleras ya que es el medio de evacuación que entrega un menor tiempo de salida, aunque existe mayor riesgo de caídas o estampidas por la misma presión de las personas. Adicionalmente, se evidenció la ventaja de utilizar rampas y escaleras cuando el número de personas en el edificio aumenta en un 40%. Al evaluar las decisiones de los agentes, se identificó que no necesariamente la salida más cercana es la conveniente, y por tanto, toda persona que se encuentre en el tercer piso debe escoger como primera opción de salida las escaleras a pesar que estas se encuentren a una mayor distancia.

El análisis de sensibilidad fue desarrollado con el objetivo de obtener un plan de evacuación que incorpore un tipo de señalización que demarque el límite de congestión a partir del cual es conveniente escoger una ruta alterna. Este nuevo plan incluye la creación de salidas de emergencia como modificación en la estructura del edificio. Para crear esta nueva señalización, se analizaron todos los puntos críticos donde el agente tiene la opción de escoger múltiples salidas. Considerando las distintas pruebas realizadas por piso, se encontraron puntos de indiferencia en donde el tiempo de evacuación es igual tomando cualquiera de las dos alternativas de salida. A partir de ese punto es recomendable escoger una ruta alterna para poder evacuar más rápido del lugar.

El cuarto piso es la zona más vulnerable en caso de presentarse una evacuación. Las personas ubicadas en este piso se encuentran más alejadas de la zona segura, y por tanto, son las últimas personas en evacuar. Además, por la misma estructura del edificio, las personas solo tienen una única opción de salida. Es decir, la zona norte puede bajar únicamente por las escaleras, mientras que la zona sur puede evacuar utilizando solo las rampas. Esto conllevó a la creación de dos puertas de salida con el objetivo de evacuar por las escaleras a las personas que se encuentran ubicadas en dos cursos de la zona sur.

Para poder disminuir la congestión en las escaleras, se realizó una prueba para bloquear una puerta de salida y considerar la ruta alterna, como la principal salida de emergencia. Éste escenario se evaluó en el segundo piso, identificando que es conveniente incluir este bloqueo para direccionar a las personas ubicadas en la zona sur a evacuar por la nueva salida principal, la cual guía a las personas a bajar por las rampas. Por tanto, este nuevo plan entregó un tiempo total de evacuación de $372,2088 \pm 1,3382$ segundos, es decir, un disminución de un 8% en comparación con el plan de evacuación existente. De igual manera que el plan de evacuación convencional, este nuevo plan evidenció una mayor tasa de salida de personas entre los 135 y 180 segundos. El nuevo plan presenta un mayor número de evacuados en promedio a partir de los 270 segundos de la evacuación, identificando que todas las personas logran salir en promedio antes de los 405 segundos.

Los resultados evidenciaron la necesidad de implementar este estudio en la etapa de planeación o diseño de nuevas edificaciones, verificando el desempeño de la evacuación e identificando las mejoras que se deben implementar para obtener una estructura que

brinde un plan de acción efectivo ante eventuales condiciones de emergencia. Esta investigación presentó el diseño de un plan de evacuación más eficiente en cuanto a tiempo de evacuación y número de personas afectadas. El nuevo planteamiento entrega instrucciones claras de cómo debe reaccionar el usuario en caso de presentarse una emergencia, identificando la ruta de salida que brinde menores tiempos de evacuación. El proceso de implementación del plan debe incluir una capacitación detallada dado que se cuenta con mayor volumen de información a ser considerado por la persona al momento de tomar una decisión de ruta. Estos planes de evacuación deben ser difundidos a todas las personas que habitualmente se encuentran en el edificio. Este proceso informativo puede implementarse por medio de capacitaciones, carteleras informativas o comunicados por correos electrónicos.

A partir de los resultados obtenidos y de los análisis realizados, se demuestra las ventajas de implementar modelos basado en agentes para representar el componente heterogéneo de las personas y la interacción entre ellos mismos y con el entorno. La plataforma de simulación, NetLogo, permitió hacer seguimiento a los agentes durante la simulación, evaluando de forma detallada las variables y las decisiones que deben tomar a lo largo de la evacuación. A pesar de esto, NetLogo presentan una limitación en cuanto al tiempo, ya que al aumentar el número de agentes se genera un aumento en el tiempo de ejecución de la simulación. Este limitante generó la necesidad de realizar los experimentos sin interfaz gráfica y así poder analizar todos los escenarios planteados en esta investigación.

Por otro lado, al realizar el simulacro de evacuación y al presenciar situaciones de riesgo es comúnmente evidenciar que las alarmas de emergencia no están cumpliendo con la función por la cual fueron creadas. Esto se debe a que las personas no reaccionan ante estos sistemas de emergencia generando que los tiempos de reacción aumenten considerablemente, siendo este un factor determinante en los tiempos totales de evacuación. Futuros trabajos deben incluir el diseño de estrategias de identificación de emergencias, facilitando a que las personas reaccionen inmediatamente ante un evento de riesgo.

En cuanto al análisis de evacuaciones, futuras investigaciones deben considerar en el proceso de calibración tomar una muestra más grande de personas a evacuar, ya que en este estudio se contó con restricciones asociadas a permisos de la universidad y a la

capacidad del salón al momento realizar el simulacro. Además, deben estar orientadas en incluir más factores de comportamiento y condiciones que se pueden generar en estos eventos, estudiando la influencia de la edad, nivel de pánico, estructuras de grupo, número de líderes, presencia de contraflujo o existencia de personas en situación de discapacidad, entre otras. Estas investigaciones se pueden considerar bajo diferentes tipos de emergencia, como puede ser emergencia por incendio, escape de gas, explosión, desastres naturales o terrorismo.

Para la elección de ruta del agente se puede usar otra forma funcional dentro de los modelos de elección discreta. Por ejemplo, un modelo logit mixto podría considerar la presencia de heterogeneidad en las preferencias de los individuos, es decir, que las personas podrían valorar de forma diferente la distancia y la densidad. Adicionalmente, dentro del modelo de elección discreta se pueden considerar más variables que pueden influir en la decisión del agente, como por ejemplo estructuras de grupo, género, edad, conocimiento de la estructura, entre otras. Validar los resultados del modelo ante un evento real y poder probarse en otras configuraciones es otro aspecto que se puede considerar en futuras investigaciones.

Estos estudios pueden incluir modelos dinámicos que permitan generar restricciones de accesibilidad en zonas del edificio, es decir, diseñar modelos que incorporen bloqueos de zonas en cualquier momento de la evacuación y cómo esto genera un cambio considerable en el plan de emergencia. En otras palabras, se propone la integración de este modelo de evacuación con un software sísmico para realizar análisis estructurales en desastres naturales.

Bibliografía

- Abdelghany, A., Abdelghany, K., Mahmassani, H., & Al-Gadhi, S. (2005). Microsimulation assignment model for multidirectional pedestrian movement in congested facilities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1939), 123-132.
- Abdelghany, A., Abdelghany, K., Mahmassani, H., & Alhalabi, W. (2014). Modeling framework for optimal evacuation of large-scale crowded pedestrian facilities. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 1105-1118.
- Aik, L. E. (2011). Exit-selection behaviors during a classroom evacuation.
- Alizadeh, R. (2011). A dynamic cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Safety Science*, 49(2), 315-323.
- Aubrey, J. B., & Dobbs, A. R. (1990). Age and sex differences in the mental realignment of maps. *Experimental Aging Research*, 16(3), 133-139.
- Bandini, S., Rubagotti, F., Vizzari, G., & Shimura, K. (2011). An agent model of pedestrian and group dynamics: experiments on group cohesion *AI*IA 2011: Artificial Intelligence Around Man and Beyond* (pp. 104-116): Springer.
- Barton, J., & Leather, J. (1995). Paxport–Passenger and Crowd Simulation. *Passenger Terminal*, 95, 71-77.
- BBC MUNDO. (2015). Arabia Saudita: al menos 717 muertos y 863 heridos en una estampida durante peregrinación a La Meca. from http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150924_arabia_saudita_muertos_estampida_mina_peregrinacion_meca_lv
- BBC MUNDO. (2016). Un incendio en un templo en India deja más de 100 muertos. from http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160409_india_incendio_templo_kerala_all
- Ben, X., Huang, X., Zhuang, Z., Yan, R., & Xu, S. (2013). Agent-based approach for crowded pedestrian evacuation simulation. *Intelligent Transport Systems, IET*, 7(1), 56-67.
- Bernardini, G., D'Orazio, M., Quagliarini, E., & Spalazzi, L. (2014). An agent-based model for earthquake pedestrians' evacuation simulation in urban scenarios. *Transportation Research Procedia*, 2, 255-263.
- Bierlaire, M., Antonini, G., & Weber, M. (2003). *Behavioral dynamics for pedestrians*: IEEE.
- Burstedde, C., Kirchner, A., Klauck, K., Schadschneider, A., & Zittartz, J. (2001). Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-applications. *arXiv preprint cond-mat/0112119*.

- Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., & Zittarz, J. (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton. *Physica A*, 295, 507.
- Camillen, F., Capri, S., Garofalo, C., Ignaccolo, M., Inturri, G., Pluchino, A., et al. (2009). *Multi agent simulation of pedestrian behavior in closed spatial environments*. Paper presented at the Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference.
- Casburn, L., Srinivasan, M., Metoyer, R. A., & Quinn, M. J. (2007). A data-driven model of pedestrian movement *Pedestrian and evacuation dynamics 2005* (pp. 189-200): Springer.
- Daoliang, Z., Lizhong, Y., & Jian, L. (2006). Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 363(2), 501-511.
- Dijkstra, J., Jessurun, J., & Timmermans, H. J. (2001). A multi-agent cellular automata model of pedestrian movement. *Pedestrian and evacuation dynamics*, 173-181.
- Dijkstra, J., Timmermans, H., & de Vries, B. (2000). *Towards a multi-agent system for visualizing simulated behavior within the built environment*. Paper presented at the Proceedings of Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning Conference: DDSS.
- Dimakis, N., Filippoupolitis, A., & Gelenbe, E. (2010). Distributed building evacuation simulator for smart emergency management. *The Computer Journal*, bxq012.
- Fang, Z., Song, W., Zhang, J., & Wu, H. (2010). Experiment and modeling of exit-selecting behaviors during a building evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(4), 815-824.
- Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. (2015). Terremoto de Haití, Informe de avance de cinco años, Enero 2015.
- Fraser-Mitchell, J. (1994). An object-oriented simulation (Crisp 11) for fire risk assessment. *Fire Safety Science*, 4, 793-804.
- Fraser-Mitchell, J. (1996). Lessons learnt during the development of CRISP2, a Monte-Carlo simulation for fire risk assessment. *Interflam'96 proceedings*, 631-639.
- Fu, L., Luo, J., Deng, M., Kong, L., & Kuang, H. (2012). Simulation of evacuation processes in a large classroom using an improved cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Procedia engineering*, 31, 1066-1071.
- Fudenberg, D., & Tirole, J. (1991). Game theory mit press. *Cambridge, MA*, 86.
- Galea, E., Owen, M., & Lawrence, P. (1996). Emergency egress from large buildings under fire conditions simulated using the EXODUS evacuation model.
- Galvis, A. C., & González, J. F. (2009). Simulador de movilidad de personas en espacios cerrados, *Ingeniero de Sistemas investigación, Ingeniería de Sistemas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá*.
- Georgoudas, I. G., Sirakoulis, G. C., & Andreadis, I. T. (2006). A simulation tool for modelling pedestrian dynamics during evacuation of large areas *Artificial Intelligence Applications and Innovations* (pp. 618-626): Springer.

- Gutierrez-Milla, A., Borges, F., Suppi, R., & Luque, E. (2014). Individual-oriented model crowd evacuations distributed simulation. *Procedia Computer Science*, 29, 1600-1609.
- Gutierrez-Milla, A., Borges, F., Suppi, R., & Luque, E. (2015). Crowd Evacuations SaaS: An ABM Approach. *Procedia Computer Science*, 51, 473-482.
- Gwynne, S., Galea, E., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (2001). Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model. *Fire Safety Journal*, 36(4), 327-357.
- Gwynne, S., Galea, E., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and environment*, 34(6), 741-749.
- Ha, V., & Lykotrafitis, G. (2012). Agent-based modeling of a multi-room multi-floor building emergency evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(8), 2740-2751.
- Han, Y., & Liu, H. (2017). Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 469, 499-509.
- Heath, B., Hill, R., & Ciarallo, F. (2009). A survey of agent-based modeling practices (January 1998 to July 2008). *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(4), 9.
- Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487-490.
- Helbing, D., Farkas, I. J., Molnar, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics*, 21(2), 21-58.
- Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5), 4282.
- Helbing, D., & Mukerji, P. (2012). Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster. *EPJ Data Science*, 1(1), 1-40.
- Henein, C. M., & White, T. (2010). Microscopic information processing and communication in crowd dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(21), 4636-4653.
- Hou, L., Liu, J.-G., Pan, X., & Wang, B.-H. (2014). A social force evacuation model with the leadership effect. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 400, 93-99.
- ICONTEC. (2004). *Norma tecnica colombiana NTC 1700: higiene y seguridad, medidas de seguridad en edificaciones, medios de evacuacion*: Icontec.
- ICONTEC. (2004). *Norma tecnica colombiana NTC 1461: higiene y seguridad: colores y senales de seguridad*: Icontec.
- Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. (2015). *Forensis 2014: datos para la vida*. Colombia.
- Ji, Q., & Gao, C. (2006). Simulating crowd evacuation with a leader-follower model. *IJCSSES*, 1(4), 249-252.
- Joo, J., Kim, N., Wysk, R. A., Rothrock, L., Son, Y.-J., Oh, Y.-g., et al. (2013). Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 32, 99-115.

- Karbovskii, V., Voloshin, D., Karsakov, A., Bezgodov, A., & Zagarskikh, A. (2015). Multiscale Agent-based Simulation in Large City Areas: Emergency Evacuation use Case. *Procedia Computer Science*, 51, 2367-2376.
- Kelton, W. D. (2002). *Simulation with ARENA*: McGraw-hill.
- Ketchell, N., Bamford, G., & Kandola, B. (1995). *Evacuation modelling: a new approach*. Paper presented at the ASIAFLAM'95, Proceedings of the 1st International Conference on Fire Science and Engineering.
- Ketchell, N., Cole, S., Webber, D., Marriott, C., Stephens, P., Brearley, I., et al. (1993). *The EGRESS code for human movement and behaviour in emergency evacuations*: University of Edinburgh, Artificial Intelligence Applications Institute.
- Kirchner, A., Nishinari, K., & Schadschneider, A. (2003). Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 67(5), 056122.
- Kirik, E., Yurgel'yan, T. y., & Krouglov, D. (2009). An intelligent floor field cellular automata model for pedestrian dynamics. *arXiv preprint arXiv:0906.2707*.
- Kisko, T. M., & Francis, R. L. (1985). EVACNET+: a computer program to determine optimal building evacuation plans. *Fire Safety Journal*, 9(2), 211-220.
- Korhonen, T., Hostikka, S., Heliövaara, S., Ehtamo, H., & Matikainen, K. (2007). *Integration of an agent based evacuation simulation and the state-of-the-art fire simulation*. Paper presented at the Proceedings of the 7th Asia-Oceania symposium on fire science & technology.
- Kountouriotis, V., Thomopoulos, S. C., & Papelis, Y. (2014). An agent-based crowd behaviour model for real time crowd behaviour simulation. *Pattern Recognition Letters*, 44, 30-38.
- Kunwar, B., Simini, F., & Johansson, A. (2014). Large scale pedestrian evacuation modeling framework using volunteered geographical information. *Transportation Research Procedia*, 2, 813-818.
- Lakoba, T. I., Kaup, D. J., & Finkelstein, N. M. (2005). Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek social force model for pedestrian evolution. *Simulation*, 81(5), 339-352.
- Leach, J. (2004). Why people 'freeze' in an emergency: temporal and cognitive constraints on survival responses. *Aviation, space, and environmental medicine*, 75(6), 539-542.
- Levin, B. M. (1989). EXITT-A simulation model of occupant decisions and actions in residential fires. *Fire Safety Science*, 2, 561-570.
- Li, S., Zhai, C., & Xie, L. (2015). Occupant evacuation and casualty estimation in a building under earthquake using cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 424, 152-167.
- Lightfoot, T. J., & Milne, G. (2003). *Modelling emergent crowd behaviour*. Paper presented at the The Australian Conference on Artificial Life (ACAL).
- Liu, S., Yang, L., Fang, T., & Li, J. (2009). Evacuation from a classroom considering the occupant density around exits. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388(9), 1921-1928.

- Lizhong, Y., Weifeng, F., & Weicheng, F. (2003). Modeling occupant evacuation using cellular automata-Effect of human behavior and building characteristics on evacuation. *Journal of Fire Sciences*, 21(3), 227-240.
- Lo, S., Fang, Z., Lin, P., & Zhi, G. (2004). An evacuation model: the SGEM package. *Fire Safety Journal*, 39(3), 169-190.
- Lo, S. M., Huang, H.-C., Wang, P., & Yuen, K. (2006). A game theory based exit selection model for evacuation. *Fire Safety Journal*, 41(5), 364-369.
- Montello, D. R., Lovelace, K. L., Golledge, R. G., & Self, C. M. (1999). Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Annals of the Association of American geographers*, 89(3), 515-534.
- Murphy, S. Ó., Brown, K. N., & Sreenan, C. (2013). *The EvacSim pedestrian evacuation agent model: development and validation*. Paper presented at the Proceedings of the 2013 Summer Computer Simulation Conference.
- Mustapha, K., Mcheick, H., & Mellouli, S. (2013). Modeling and simulation agent-based of natural disaster complex systems. *Procedia Computer Science*, 21, 148-155.
- Neumann, J. v., & Burks, A. W. (1966). Theory of self-reproducing automata.
- Okazaki, S., & Matsushita, S. (1993). *A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing*. Paper presented at the International Conference on Engineering for Crowd Safety.
- Olsson, P. Å., & Regan, M. A. (2001). A comparison between actual and predicted evacuation times. *Safety Science*, 38(2), 139-145.
- Ortúzar, J. d. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*: Wiley New Jersey.
- Owen, M., Galea, E., & Lawrence, P. (1997). Advanced occupant behavioural features of the building-EXODUS evacuation model. *Fire Safety Science*, 5, 795-806.
- Owen, M., Galea, E. R., & Lawrence, P. J. (1996). The EXODUS evacuation model applied to building evacuation scenarios. *Journal of Fire Protection Engineering*, 8(2), 65-84.
- Ozel, F. (1992). Simulation modeling of human behavior in buildings. *Simulation*, 58(6), 377-384.
- Pan, X., Han, C. S., Dauber, K., & Law, K. H. (2007). A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *Ai & Society*, 22(2), 113-132.
- Parisi, D., & Dorso, C. (2005). Microscopic dynamics of pedestrian evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 354, 606-618.
- Pelechano, N., Allbeck, J. M., & Badler, N. I. (2007). *Controlling individual agents in high-density crowd simulation*. Paper presented at the Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation.
- Pelechano, N., & Badler, N. I. (2006). Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation. *Departmental Papers (CIS)*, 272.
- Pelechano, N., & Malkawi, A. (2008). Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in construction*, 17(4), 377-385.

- Pelechano, N., O'Brien, K., Silverman, B., & Badler, N. (2005). *Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication*: DTIC Document.
- Peng, S., Yang, K., Xu, Q., & He, Y. (2010). *The Simulation Research on the Evacuation Model of Supermarket by Using GIS and Agent-based Modeling Technology*. Paper presented at the Intelligence Information Processing and Trusted Computing (IPTC), 2010 International Symposium on.
- Perez, G. J., Tapang, G., Lim, M., & Saloma, C. (2002). Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(3), 609-618.
- Poon, L. (1985). *Numerical Modelling Of Human Behaviour During Egress In Multi-Storey Office Building Fires Using Evacsim-Some Validation Studies*. Paper presented at the Proceedings of the Int Conf on Fire Science and Engineering, ASIAFLAM'95, 163.
- Poon, L. S. (1994). EvacSim: A simulation model of occupants with behavioural attributes in emergency evacuation of high-rise building fires. *Fire Safety Science*, 4, 681-692.
- Qiu, F., & Hu, X. (2010). Modeling group structures in pedestrian crowd simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(2), 190-205.
- Railsback, S. F., & Grimm, V. (2011). *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*: Princeton university press.
- Reisser-Weston, E. (1996). *Simulating human behaviour in emergency situations*. Paper presented at the RINA, International Conference of Escape, Fire, and Rescue.
- Rizk-Jackson, A. M., Acevedo, S. F., Inman, D., Howieson, D., Benice, T. S., & Raber, J. (2006). Effects of sex on object recognition and spatial navigation in humans. *Behavioural brain research*, 173(2), 181-190.
- Ronchi, E., Uriz, F. N., Criel, X., & Reilly, P. (2016). Modelling large-scale evacuation of music festivals. *Case Studies in Fire Safety*, 5, 11-19.
- Sagun, A., Bouchlaghem, D., & Anumba, C. J. (2011). Computer simulations vs. building guidance to enhance evacuation performance of buildings during emergency events. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(3), 1007-1019.
- Sarmady, S., Haron, F., & Talib, A. Z. H. (2008). *Multi-agent simulation of circular pedestrian movements using cellular automata*. Paper presented at the Modeling & Simulation, 2008. AICMS 08. Second Asia International Conference on.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2016). *Informe de situación No.64 (11/05/2016) 18H00 Terremoto 7.8 Pedernales*.
- Shen, T.-S., & Chien, S.-W. (2004). AN EVACUATION SIMULATION MODEL (ESM) FOR BUILDING EVALUATION.
- Shestopal, V., & Grubits, S. (1994). Evacuation model for merging traffic flows in multi-room and multi-storey buildings. *Fire Safety Science*, 4, 625-632.

- Shi, C., Zhong, M., Nong, X., He, L., Shi, J., & Feng, G. (2012). Modeling and safety strategy of passenger evacuation in a metro station in China. *Safety Science*, 50(5), 1319-1332.
- Shi, J., Ren, A., & Chen, C. (2009). Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions. *Automation in Construction*, 18(3), 338-347.
- Song, W., Xu, X., Wang, B.-H., & Ni, S. (2006). Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 363(2), 492-500.
- Song, W., Yu, Y., Fan, W., & Zhang, H. (2005). A cellular automata evacuation model considering friction and repulsion. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 48(4), 403-413.
- Spearpoint, M. (2004). The effect of pre-evacuation on evacuation times in the Simulex model. *Journal of Fire Protection Engineering*, 14(1), 33-53.
- Still, G. K. (1993). New computer system can predict human behavioural response to building fires. *Fire*, 85(1051), 40.
- Takahashi, K., Tanaka, T., & Kose, S. (1989). An evacuation model for use in fire safety design of buildings. *Fire Safety Science*, 2, 551-560.
- Tan, L., Hu, M., & Lin, H. (2015). Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency. *Information Sciences*, 295, 53-66.
- Tan, L., Wu, L., & Lin, H. (2015). An individual cognitive evacuation behaviour model for agent-based simulation: a case study of a large outdoor event. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(9), 1552-1568.
- Tang, F., & Ren, A. (2008). Agent-based evacuation model incorporating fire scene and building geometry. *Tsinghua Science & Technology*, 13(5), 708-714.
- Thompson, P., Wu, J., & Marchant, E. (1997). Simulex 3.0: Modelling evacuation in multi-storey buildings. *Fire Safety Science*, 5, 725-736.
- Thompson, P. A., & Marchant, E. W. (1995a). A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire safety journal*, 24(2), 131-148.
- Thompson, P. A., & Marchant, E. W. (1995b). Testing and application of the computer model 'SIMULEX'. *Fire Safety Journal*, 24(2), 149-166.
- Tissera, P. C., Castro, A., Printista, A. M., & Luque, E. (2013). Evacuation simulation supporting high level behaviour-based agents. *Procedia Computer Science*, 18, 1495-1504.
- Tissera, P. C., Printista, A. M., & Errecalde, M. L. (2007). Evacuation simulations using cellular automata. *Journal of Computer Science & Technology*, 7.
- Tissera, P. C., Printista, A. M., & Luque, E. (2012). A hybrid simulation model to test behaviour designs in an emergency evacuation. *Procedia Computer Science*, 9, 266-275.
- Toyama, M. C., Bazzan, A. L., & Da Silva, R. (2006). *An agent-based simulation of pedestrian dynamics: from lane formation to auditorium evacuation*. Paper presented at the Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems.

- Varas, A., Cornejo, M., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Munoz, V., et al. (2007). Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 382(2), 631-642.
- Vizzari, G., Manenti, L., Ohtsuka, K., & Shimura, K. (2015). An agent-based pedestrian and group dynamics model applied to experimental and real-world scenarios. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 19(1), 32-45.
- Wagner, N., & Agrawal, V. (2014). An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2807-2815.
- Wagoum, A. U. K., Chraibi, M., Mehlich, J., Seyfried, A., & Schadschneider, A. (2012). Efficient and validated simulation of crowds for an evacuation assistant. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 23(1), 3-15.
- Wilensky, U. (2010). Netlogo, 1999. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL.*
- World Health Organization. (2010). *Injuries and Violence the Fact*. Geneve, Switzerland: WHO Press.
- Xiaoping, Z., Tingkuan, Z., & Mengting, L. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, 44(3), 437-445.
- Xiaoping, Z., Wei, L., & Chao, G. (2010). Simulation of evacuation processes in a square with a partition wall using a cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 389(11), 2177-2188.
- Xu, M., Wu, Y., Lv, P., Jiang, H., Luo, M., & Ye, Y. (2015). miSFM: On combination of Mutual Information and Social Force Model towards simulating crowd evacuation. *Neurocomputing*, 168, 529-537.
- Yang, B., Ren, B., & Wu, Y.-g. (2012). The research of multi-resolution modeling and simulation of the emergency evacuation. *Procedia Engineering*, 29, 3110-3116.
- Yang, L., Fang, W., Huang, R., & Deng, Z. (2002). Occupant evacuation model based on cellular automata in fire. *Chinese Science Bulletin*, 47(17), 1484-1488.
- Yang, L., Zhao, D., Li, J., & Fang, T. (2005). Simulation of the kin behavior in building occupant evacuation based on cellular automaton. *Building and Environment*, 40(3), 411-415.
- Yang, Y., Deng, J., Xie, C.-c., & Jiang, Y.-t. (2014). Design and implementation of fire safety evacuation simulation software based on cellular automata model. *Procedia engineering*, 71, 364-371.
- Yuan, W., & Tan, K. H. (2007). An evacuation model using cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 384(2), 549-566.
- Yuan, W., & Tan, K. H. (2009). Cellular automata model for simulation of effect of guiders and visibility range. *Current Applied Physics*, 9(5), 1014-1023.
- Zarboutis, N., & Marmaras, N. (2007). Design of formative evacuation plans using agent-based simulation. *Safety Science*, 45(9), 920-940.

- Zhang, J., Song, W., & Xu, X. (2008). Experiment and multi-grid modeling of evacuation from a classroom. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(23), 5901-5909.
- Zhao, D., Yang, L., & Li, J. (2008). Occupants' behavior of going with the crowd based on cellular automata occupant evacuation model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(14), 3708-3718.
- Zheng, M., Kashimori, Y., & Kambara, T. (2002). *A model describing collective behaviors of pedestrians with various personalities in danger situations*. Paper presented at the Neural Information Processing, 2002. ICONIP'02. Proceedings of the 9th International Conference on.
- Zheng, Y., Jia, B., Li, X.-G., & Zhu, N. (2011). Evacuation dynamics with fire spreading based on cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(18), 3147-3156.

Anexo 1: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque de fuerza social

Autor(es)	Objetivo			Entorno de Simulación			Caso de Estudio				Métrica de Evaluación			Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes									
	Obtener la salida óptima y su respectiva ruta	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Desastre Natural	Movimiento de Multitudes	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de afectados	Curvas de tiempo de evacuación	Nivel de pánico	Número de Líderes	Número de puertas de salida	Número de obstáculos	Tamaño de la puerta de salida	Velocidad	Nivel de Familiaridad	Distancia a la puerta	Densidad en el cuello de botella
D. Helbing, I. -J. Farkas & T.Vicsek (2000)			✓			✓		✓				✓	✓		✓								
D. Helbing, I.-J. Farkas, P. Molnár & T. Vicsek (Helbing et al., 2002)		✓	✓			✓	✓			✓		✓			✓			✓		✓			
M. Zheng, Y. Kashimori & T. Kambara (M. Zheng, Kashimori, & Kambara, 2002)		✓	✓			✓		✓	✓	✓					✓								
D.-R. Parisi & C.-O. Dorso (Parisi & Dorso, 2005)			✓			✓	✓							✓	✓				✓	✓			
T.-I Lakoba, D.-J. Kaup & N.-M. Finkelstein (2005)		✓				✓	✓					✓			✓			✓					✓
W. Song, X. Xu, B. Wang & S, Ni (2006)		✓				✓	✓					✓							✓	✓			
L. Hou, J. Liu, X. Pan & B. Wang (2014)		✓				✓		✓				✓				✓	✓						
M. Xu, Y. Wu, P. Lv, H.Jiang, M. Luo & Y. Ye (2015)		✓	✓			✓	✓					✓					✓						
Y. Han & H. Liu (2017)	✓	✓				✓	✓					✓							✓		✓	✓	✓

Anexo 2: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque de autómatas celulares

Autor(es)	Objetivo				Entorno de Simulación			Caso de Estudio		Métrica de Evaluación						Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes																
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Obtener la salida óptima y su respectiva ruta	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Movimiento de Multitudes	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de personas afectadas	Flujo de personas	Varianza en la estrategia de enrutamiento	Velocidad promedio	Número de salidas	Género	Edad	Número de líderes	Número de personas	Nivel de pánico	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la salida	Velocidad	Densidad de personas en el cuello de botella	Estructura de grupos	Contraflujo peatones	El flujo hacia la salida	Distancia promedio hacia la salida	Tiempo de Reacción
C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider & J. Zittartz (2001)		✓					✓		✓			✓														✓	✓		✓			
S. Gwynne, E.-R. Galea, P.-J. Lawrence & L. Filippidis (2001)		✓	✓				✓		✓						✓			✓						✓								
C. Burstedde, A. Kirchner, K. Klauck, A. Schadschneider & J. Zittartz (2001)		✓					✓	✓				✓															✓				✓	
G.-J. Perez, G. Tapang, M. Lim & C. Saloma (2002)		✓					✓	✓						✓			✓								✓							
L. Yang, W. Fang, R. Huang & Z. Deng (2002)			✓				✓		✓			✓														✓						
A. Kirchner, K. Nishinari & A. Schadschneider (2003)		✓					✓	✓				✓																		✓	✓	
T.- J. Lightfoot & G.- J. Milne (2003)		✓					✓			✓		✓	✓																	✓		
Y. Lizhong, F.Weifeng & F. Weicheng(2003)			✓				✓		✓			✓														✓					✓	
S.M. Lo, Z. Fang, P. Ling & G.S. Zhi (2004)		✓					✓	✓				✓						✓	✓					✓	✓	✓	✓					
A. Abdelghany, K. Abdelghany, H.-S. Mahmassani & S.-A. Al-Gadhi (2005)			✓			✓				✓				✓							✓						✓					

[illegible]

Autor(es)	Objetivo				Entorno de Simulación		Caso de Estudio		Métrica de Evaluación						Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes																	
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Obtener la salida óptima y su respectiva ruta	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Movimiento de Multitudes	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de personas afectadas	Flujo de personas	Varianza en la estrategia de enrutamiento	Velocidad promedio	Número de salidas	Género	Edad	Número de líderes	Número de personas	Nivel de pánico	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la salida	Velocidad	Densidad de personas en el cuello de botella	Estructura de grupos	Contraflujo peatones	El flujo hacia la salida	Distancia promedio hacia la salida	Tiempo de Reacción
L. Fu, J. Luo, M. Deng, L. Kong & H. Kuang (2012)		✓					✓	✓				✓															✓				✓	
A. Abdelghany, K. Abdelghany, H. Mahmassani & W. Alhalabi (2014)				✓			✓	✓			✓																✓				✓	✓
Y. Yang, J. Deng, C. Xie & Y. Jiang (2014)		✓	✓				✓		✓		✓							✓	✓												✓	
S. Li, C. Zhai & L. Xie (2015)		✓					✓			✓		✓	✓										✓	✓	✓		✓				✓	

Anexo 3: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque de teoría de juegos

Autor(es)	Objetivo			Entorno de Simulación			Caso de Estudio			Métrica de Evaluación				Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes											
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Desastre Natural	Movimiento de Multitudes	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de personas	Flujo de personas	Varianza en la estrategia de evacuación	Número de salidas	Número de líderes	Número de personas	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la puerta	Velocidad	Densidad en el cuello de botella	Contraflujo de peatones	Flujo hacia la salida	Distancia promedio hacia la salida
S.-M. Lo, H.-C. Huang, P. Wang & K.-K. Yuen (2006)		✓				✓	✓				✓									✓		✓			✓

Anexo 4: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando el enfoque basado en agentes

Autor(es)	Objetivo				Entorno de Simulación		Caso de Estudio					Métrica de Evaluación						Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes																	
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Modelar la evacuación con un enfoque en accesibilidad espacial	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Desastres Naturales	Movimiento de Multitudes	Amenaza de bomba	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de afectados	Flujo de personas	Velocidad promedio	Varianza en la estrategia de enrutamiento	Curvas de tiempo de evacuación	Número de salidas	Género	Edad	Número de líderes	Número de personas a evacuar	Nivel de pánico	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la 'puerta'	Velocidad	Densidad de personas en el cuello de botella	Estructura de grupos	Contraflujo de peatones	Flujo hacia la salida	Distancia promedio hacia la salida	Tiempo de Reacción
P. Thompson & E. Marchant (1995b)		✓					✓	✓						✓		✓												✓							
P. Olsson & M. Regan (2001)			✓				✓		✓					✓															✓					✓	✓
M. Bierlaire, G. Antonini & M. Weber (2003)			✓				✓				✓			✓									✓	✓			✓		✓						
M. Spearpoint (2004)		✓					✓	✓						✓																					✓
X. Pan, C. -S. Han, K. Dauber & K. -H. Law (2007)			✓				✓	✓					✓												✓	✓				✓	✓				
F. Tang & A. Ren (2008)		✓					✓		✓					✓													✓		✓					✓	✓
A. Galvis & Juan. Gómez (2009)		✓					✓	✓						✓							✓	✓			✓		✓			✓	✓				
J. Shi, A. Ren & C. Chen (2009)		✓					✓		✓					✓						✓							✓	✓							✓
F. Camillen, S. Capri, C. Garofalo, M. Ignaccolo, G. Inturri, A. Pluchino, A. Rapisarda & S. Tudisco (2009)			✓				✓	✓					✓							✓				✓							✓				
F. Qiu & X. Hu (2010)	✓						✓				✓					✓															✓				
N. Dimakis, A. Filippoupolitis & E. Gelenbe (2010)		✓					✓	✓						✓															✓						

Autor(es)	Objetivo				Entorno de Simulación		Caso de Estudio				Métrica de Evaluación						Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes																			
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Modelar la evacuación con un enfoque en accesibilidad espacial	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Desastres Naturales	Movimiento de Multitudes	Amenaza de bomba	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de afectados	Flujo de personas	Velocidad promedio	Varianza en la estrategia de enrutamiento	Curvas de tiempo de evacuación	Número de salidas	Género	Edad	Número de líderes	Número de personas a evacuar	Nivel de pánico	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la 'puerta'	Velocidad	Densidad de personas en el cuello de botella	Estructura de grupos	Contraflujo de peatones	Flujo hacia la salida	Distancia promedio hacia la salida	Tiempo de Reacción	
S. Peng, K. Yang, Q. Xu & Y. He (2010)		✓					✓		✓					✓		✓																		✓		
S. Bandini, F. Rubagotti, G. Vizzari & K. Shimura (2011)	✓						✓				✓					✓															✓	✓		✓		
B. Yang, B. Ren & Y. Wu (2012)		✓			✓			✓						✓																✓				✓		
S. Congling, Z. Maohua, N. Xingzhong, H. Li, S. Jiehong & F. Guoguan (2012)			✓				✓		✓					✓							✓	✓							✓				✓			
J. Joo, N. Kim, R.-A. Wysk, L. Rothrock, Y. Son, Y. Oh & S. Lee (2013)			✓				✓		✓				✓		✓					✓				✓												
K. Mustapha, H. Mcheick & S. Mellouli (2013)		✓			✓					✓			✓									✓									✓					
S.-Ó. Murphy, K.-N. Brown & C. Sreenan (2013)		✓					✓	✓								✓										✓		✓	✓	✓			✓			
B. Kunwar, F. Simini & A. Johansson (2014)		✓			✓					✓				✓																					✓	
G. Bernardini , M. D'Orazio, E. Quagliarini & L. Spalazzi (2014)			✓		✓					✓							✓														✓					
N. Wagner & V. Agrawal (2014)		✓					✓		✓				✓		✓					✓										✓				✓		
A.-G. Milla, F. Borges, R. Suppi & E. Luque (2014)		✓					✓	✓						✓											✓	✓			✓					✓		
L. Tan, M. Hu & H. Lin (2015)			✓	✓			✓		✓					✓													✓									
L. Tan, L. Wu & H. Lin (2015)			✓	✓		✓					✓							✓			✓	✓					✓									
G. Vizzari, L. Manenti, K. Ohtsuka & K. Shimura (2015)	✓	✓				✓					✓					✓															✓	✓				
A.-G. Milla, F. Borges, R. Suppi & E. Luque (2015)		✓			✓									✓														✓							✓	

Autor(es)	Objetivo				Entorno de Simulación		Caso de Estudio				Métrica de Evaluación					Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes																			
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Modelar la evacuación con un enfoque en accesibilidad espacial	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Desastres Naturales	Movimiento de Multitudes	Amenaza de bomba	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de afectados	Flujo de personas	Velocidad promedio	Varianza en la estrategia de enrutamiento	Curvas de tiempo de evacuación	Número de salidas	Género	Edad	Número de líderes	Número de personas a evacuar	Nivel de pánico	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la puerta	Velocidad	Densidad de personas en el cuello de botella	Estructura de grupos	Contraflujo de peatones	Flujo hacia la salida	Distancia promedio hacia la salida	Tiempo de Reacción
V. Karbovskii, D. Voloshin, A. Karsakov, A. Bezgodov & A. Zagarskikh (2015)		✓					✓	✓						✓												✓			✓						
E. Ronchi, F.-N. Uriz, X. Criel & P. Reilly (2016)		✓				✓			✓			✓							✓	✓													✓	✓	

Anexo 5: Artículos dinámica de peatones ante situaciones normales y de emergencia empleando modelos híbridos

Autor(es)	Objetivo				Entorno de Simulación			Caso de Estudio			Enfoque de modelación				Métrica de Evaluación				Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes															
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Obtener la salida optima y su respectiva ruta	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Movimiento de multitudes	Basado en agentes	Automata celular	Teoría de Juegos	Fuerza Social	Otros	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de afectados	Flujo de personas	Velocidad promedio	Número de salidas	Género	Edad	Número de líderes	Número de personas a evacuar	Nivel de pánico	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la 'puerta	Velocidad	Densidad de personas en el cuello de botella	Psicología de desastres	Estructura de grupos	Distancia promedio hacia la salida
J.Dijkstra , H.-J.-P. Timmermans & B. de Vries (2000)			✓				✓			✓	✓	✓								✓											✓			
J. Dijkstra, J. Jessurun & H. Timmermans (2001)		✓					✓			✓	✓	✓								✓											✓			
N. Pelechano, K. O'Brien, B. Silverman & N. Badler (2005)			✓				✓	✓			✓			✓			✓									✓		✓				✓		
L.-Z. Yang, D.-L. Zhao, J. Li & T.-Y. Fang (2005)	✓	✓					✓	✓				✓		✓			✓				✓									✓		✓		
M.-C. Toyama, A.-L.-C. Bazzan & R. da Silva (2006)			✓				✓	✓			✓	✓					✓	✓	✓			✓							✓	✓	✓		✓	✓
N. Pelechano & N.-I. Badler (2006)			✓				✓	✓			✓			✓			✓				✓			✓	✓			✓						
T. Korhonen, S. Hostikka, S. Heliövaara, H. Ehtamo & K. Matikainen (2007)				✓			✓		✓		✓			✓			✓		✓									✓		✓			✓	✓
N. Zarboutis & N. Marmaras (2007)		✓	✓				✓		✓		✓	✓					✓						✓							✓				✓
N. Pelechano, J.-M. Allbeck & N.-I. Badler (2007)			✓				✓	✓			✓			✓			✓									✓	✓				✓			
S. Sarmady, F. Haron & A.-Z.-H.Talib (2008)			✓			✓				✓	✓	✓							✓				✓			✓		✓					✓	
D. Zhao, L.Yang & J. Li (2008)		✓					✓	✓				✓		✓			✓													✓		✓		
Z. Xiaoping, L. Wei & G. Chao (2010)			✓				✓	✓				✓		✓			✓	✓													✓			✓

Autor(es)	Objetivo				Entorno de Simulación			Caso de Estudio			Enfoque de modelación			Métrica de Evaluación			Factores que influyen en la evacuación o en el comportamiento de multitudes																		
	Modelar estructuras de grupos en multitudes	Modelar escenarios de evacuación/multitudes	Modelar el comportamiento humano en una evacuación/multitudes	Obtener la salida optima y su respectiva ruta	Áreas Urbanas	Áreas al aire libre	Edificaciones	Emergencia en General	Incendio/Humo	Movimiento de multitudes	Basado en agentes	Autómata celular	Teoría de Juegos	Fuerza Social	Otros	Tiempo promedio de evacuación	Tiempo total de evacuación	Número de afectados	Flujo de personas	Velocidad promedio	Número de salidas	Género	Edad	Número de líderes	Número de personas a evacuar	Nivel de pánico	Número de obstáculos	Nivel de familiaridad	Tamaño de la 'puerta	Velocidad	Densidad de personas en el cuello de botella	Psicología de desastres	Estructura de grupos	Distancia promedio hacia la salida	
C.-M. Henein & T. White (2010)			✓				✓	✓			✓	✓		✓				✓										✓						✓	
V. Ha & G. Lykotrafitis (2012)		✓					✓	✓			✓			✓			✓												✓	✓					
P.-C. Tissera, A.-M. Printista & E. Luque (2012)			✓				✓		✓		✓	✓				✓	✓												✓			✓			✓
A.-U.-K. Wagoum, M. Chraibi, J. Mehlich, A. Seyfried & A. Schadschneider (2012)		✓					✓	✓				✓		✓			✓										✓								
P.-C. Tissera, A. Castro, A.-M. Printista & E. Luque (2013)		✓	✓				✓		✓		✓	✓					✓					✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
X. Ben, X. Huang, Z. Zhuang, R. Yan & S. Xu (2013)		✓	✓				✓	✓			✓	✓					✓					✓			✓		✓	✓				✓			✓
V. Kountouriotis, S.-C.-A. Thomopoulos & Y. Papelis (2014)	✓						✓			✓	✓			✓		✓																✓			

Anexo 6: Descripción del código

Este anexo presenta una descripción general del código desarrollado en NetLogo para representar la evacuación de un edificio según el plan propuesto en el capítulo 5. Se detallan los aspectos relevantes que consideraron para la construcción del modelo de simulación presentado en esta investigación. La metodología para el desarrollo del código se presenta a continuación:

1. Declarar variables globales, los tipos de agente, los atributos cada agente y atributos de las celdas (patches).

```
globals []  
breed []  
patches-own []  
pedestrians-own []
```

2. Definir el procedimiento para la configuración del modelo (setup procedure).

```
to setup  
  clear-all ;; Reinicializa el modelo  
  draw-walls ;; Procedimiento para crear la estructura  
  escalera ;; Procedimiento para crear la escaleras  
  rampa ;; Procedimiento para crear las rampas  
  peatones ;; Procedimiento para crear peatones  
  ask pedestrians [  
    set shape "person" ;; Cambia la forma del agente a persona  
    set ind-time 0 ;; Inicializa el tiempo individual de evacuación  
    set color one-of [ blue red ] ;; Define si el peatón es hombre o mujer  
    velocidad] ;; Procedimiento para definir la velocidad del agente  
    set max-tiempo 0 ;; Inicializa la variable global del tiempo final de evacuación  
    reset-ticks;; Reinicia el contador de ticks  
  ]  
end
```

3. Definir el procedimiento para que el modelo se ejecute (go procedure). Se utiliza la primitiva tick con el fin de hacer avanzar el contador de ticks, el cual representa el tiempo de simulación.

```
to go  
  ask pedestrians [  
    if switch = 0  
    [tiempo-reaccion] Procedimiento para definir el tiempo de reacción del peatón  
    ifelse color = blue;;Hombre  
    [if ticks * 0.4 / ( 0.377596 * (1.3)) >= t-reaccion ;; Define cuando se mueve el agente  
      [move]]  
    [let velo ((0.0816222 * 1.3) + (0.308078 * 1.3) + (0.512586 * 1.3)) / 3
```

```

    if ticks * 0.4 / velo >= t-reaccion
    [move]]]
  if count pedestrians = 0 ;;Define la condición de finalización de la simulación
  stop]
  tick ;; Representa el Contador de ticks
end

```

4. Crear la estructura del entorno por piso. En esta procedimiento se utiliza el agente wall que representa las paredes, las escaleras y las rampas, es decir, los obstáculos en la simulación.

```

to draw-walls ;;Crear la estructura
  ask patches with [pzcor = piso] [
    if (pxcor = min-pxcor and pycor >= 6 and pycor <= 76) or (pycor = 76 and pxcor >= 80
and pxcor <= 107) or (pycor = 76 and pxcor >= 39 and pxcor <= 71) or ... ( pxcor = 3 and
pycor >= 22 and pycor <= 27) or ( pxcor >= 3 and pxcor <= 11 and pycor = 14) or ( pxcor
>= 3 and pxcor <= 11 and pycor = 25)) [set pcolor 4 sprout-walls 1]
  end

```

```

to rampa;;Crear las rampas
  ask patches with [(pxcor >= 98 and pxcor <= 100 and pycor >= 29 and pycor <= 31 and
pzcor = 1) or (pxcor >= 98 and pxcor <= 100 and pycor >= 26 and pycor <= 28 and pzcor
= 2) ... or (pxcor >= 102 and pxcor <= 104 and pycor >= 8 and pycor <= 12 and pzcor =
10)] [set pcolor 5 sprout-walls 1]
end

```

```

to escalera ;;Crear las escaleras
  ask patches with [(pxcor = escalon-x and pycor >= min-esc and pycor <= max-esc and
pzcor = escalon-y)] [set pcolor 5 sprout-walls 1]
  if escalon-x > 17 or escalon-y < 13
  [ set escalon-x escalon-x - 1
    set escalon-y escalon-y + 1
    escalera1-2-1]
  ask patches with [(pxcor >= 11 and pxcor <= 17 and pycor >= 41 and pycor <= 47 and
pzcor = 13 )]
  [set pcolor 5 sprout-walls 1]
  set min-esc 41
  set max-esc 43
  set escalon-x 17
  set escalon-y 14
end

```

5. Crear los peatones en cada piso, definiendo el número de personas asignadas para cada zona.

```
to peatones ;; Crear los peatones
  ask n-of (15 * (1 + porc)) patches with [ pxcor > 52 and pxcor < 80 and pycor > 55 and
  pycor < 76 and pzcor = 1] [sprout-pedestrians 1] ...
end
```

6. Procedimiento para determinar los atributos del agente (velocidad, tiempo de reacción y densidad percibida en distintas zonas).

```
to velocidad ;; La velocidad fue calibrada con el simulacro de evacuación del Bloque 25E
  if color = 105 ;; Hombre
    [set vel random-normal (0.377596 * (1.3)) 0.182453]
  if color = 15 ;; Mujer
    [set vel z-random-triangular (0.0816222 * (1.3)) (0.308078 * (1.3)) (0.512586 * (1.3))]
end
```

```
to tiempo-reaccion ;; Determina el tiempo de reacción de cada peatón
  set switch 1
  set t-reaccion z-random-triangular (3.84747 * 0.95) (33 * 0.95) (43.5156 * 0.95)
  set ind-time t-reaccion
end
```

```
to densidad ;; Determina la densidad percibida por un peatón en una zona de salida
  if cambio = 0 [
    set cambio 1
    let c1 count turtles with [xcor >= 24 and xcor <= 52 and ycor >= 63 and ycor <= 69 and
    zcor = 1]
    let pat1 count patches with [(pxcor >= 24 and pxcor <= 52 and pycor >= 63 and pycor <=
    69 and pzcor = 1) and pcolor != 4]
    set densidad1 c1 / (pat1 * 0.16)
    let c2 count turtles with [xcor >= 24 and xcor <= 52 and ycor >= 70 and ycor <= 76 and
    zcor = 1]
    let pat2 count patches with [(pxcor >= 24 and pxcor <= 52 and pycor >= 70 and pycor <=
    76 and pzcor = 1) and pcolor != 4]
    set densidad2 c2 / (pat2 * 0.16)
  ]
end
```

7. Definir el procedimiento move, el cual direcciona a otro procedimiento que hace que el peatón se mueva de su punto inicial hacia la salida final. Cuando las personas logran evacuar y salen de la simulación, en este procedimiento se guarda los atributos del agente y las variables de salida del sistema.

```

to move
  ifelse (xcor >= 33 and xcor <= 38 and ycor = 76 and zcor = 1)
  or (xcor >= 72 and xcor <= 79 and ycor = 76 and zcor = 1)
  or (xcor >= 108 and xcor <= 111 and ycor = 76 and zcor = 1)
  [ fd 1
    set ind-time ind-time + (0.4 / vel) ;; Tiempo de evacuación por peatón
    set evacuation evacuation + 1 ;; Número de evacuados
    if ind-time > max-tiempo
      [ set max-tiempo ind-time ] ;;Para obtener el tiempo final de evacuación
    if ind-time <= 45 ;;Para construir gráfica de número de evacuados vs. Tiempo
    [ set number1 number1 + 1 ] ;;Contador del número de personas que logran evacuar
    antes de 90 segundos.
    if ind-time <= 90
      [set number2 number2 + 1]
    if ind-time <= 135
      [set number3 number3 + 1]
    if ind-time <= 180
      [set number4 number4 + 1]
    if ind-time <= 225
      [set number5 number5 + 1]
    if ind-time <= 270
      [set number6 number6 + 1]
    if ind-time <= 315
      [set number7 number7 + 1]
    if ind-time <= 360
      [set number8 number8 + 1]
    if ind-time <= 405
      [set number9 number9 + 1]
    if ind-time <= 450
      [set number10 number10 + 1]
    die ] ;;Cuando el peatón sale de la simulación
  end

```

8. Procedimiento para el movimiento de peatones al bajar por las escaleras o rampas. El agente emplea este procedimiento únicamente cuando se encuentre ubicado en algunos de estos dos medios de evacuación. En caso de moverse en alguno de los pisos del edificio, se utilizará el procedimiento go-if-empty-nearby.

```

to go-stairs2
  ifelse xcor >= 17 and xcor <= 26 and ycor >= 41 and ycor <= 43 and zcor >= 14 and zcor
  <= 24
  [ if (xcor = 26 and ycor >= 41 and ycor <= 43 and zcor = 24) and escal2 = 0
    [ set escal2 1

```

```

set escalera2 escalera2 + 1]
let x xcor - 1
let z zcor - 1
let empty-patch patches with [pxcor = x and pycor >= 41 and pycor <= 43 and pzcor = z]
with [not any? turtles-here and pcolor != 4]
if any? empty-patch
[ let target one-of empty-patch
  face target
  move-to target]] ...
[ if (xcor >= 98 and xcor <= 100 and ycor >= 28 and ycor <= 32 and zcor = 24);;Último
escalón para llegar al 2ndo piso
[ let empty-patch neighbors with [not any? turtles-here and pcolor != 4 and pcolor != 5
and (pxcor >= 98 and pxcor <= 100 and pycor >= 28 and pycor <= 33 and pzcor = 24)]
if any? empty-patch
[ ask empty-patch
[ set mini min (list distancexyz-nowrap 98 33 24
distancexyz-nowrap 99 33 24
distancexyz-nowrap 100 33 24)]
let target min-one-of empty-patch [mini]
face target
move-to target]]]]]]]]]]
set ind-time ind-time + (0.4 / ( vel * 2))
end
;-----

```

9. Procedimiento para el movimiento de peatones en cada uno de los pisos del edificio. Dependiendo de su ubicación, el agente se direcciona a distintas zonas o puertas que lo conducirán a la salida final.

```

to go-if-empty-nearby-1
  set piso 1
  let empty-patches neighbors with [not any? turtles-here and pcolor != 4 and pcolor != 5
and pzcor = piso]
  ifelse (xcor > 12 and xcor < 21 and ycor > 6 and ycor < 13 and zcor = piso)
    [ ask empty-patches
      [ set mini min (list distancexyz-nowrap 19 13 piso
distancexyz-nowrap 20 13 piso)]
      let target min-one-of empty-patches [mini]
      face target
      move-to target] ...
    [ ifelse (xcor > 35 and xcor <= 85 and ycor > 13 and ycor < 17 and zcor = piso) or (xcor
>= 35 and xcor <= 85 and ycor = 13 and zcor = piso) or (xcor >= 44 and xcor <= 84 and
ycor = 17 and zcor = piso)
      [ if sw1 != 29 and origen != 27
        [datos]
        if ruta = 1
          [ ask empty-patches
            [set mini min (list distancexyz-nowrap 35 14 piso

```

```

distancexyz-nowrap 35 15 piso
distancexyz-nowrap 35 16 piso))]
if ruta = 2
  [ ask empty-patches
    [set mini min (list distancexyz-nowrap 64 18 piso
      distancexyz-nowrap 65 18 piso)]]
  let target min-one-of empty-patches [mini]
  face target
  move-to target]
[ ask empty-patches ;; En otro caso
  [ set mini min (list distancexyz-nowrap 108 76 piso
    distancexyz-nowrap 109 76 piso
    distancexyz-nowrap 110 76 piso
    distancexyz-nowrap 111 76 piso)]
  let target min-one-of empty-patches [mini]
  face target
  move-to target]]
set ind-time ind-time + (0.4 / vel)
end

```

10. Procedimiento para definir la ruta escogida por el agente. Conociendo los valores de la distancia a la puerta y la densidad percibida en esa zona, se implementa el modelo de elección discreta presentado en la sección 3.1.

```

to datos
  set V1 -0.27 * distance1 - 0.908 * densidad1
  set V2 -0.27 * distance2 - 0.908 * densidad2
  set p1 exp (V1) / ( exp (V1) + exp (V2) )
  set p2 1 - p1
  let randm random-float 1
  ifelse (randm >= 0 and randm < p1)
  [set ruta 1]
  [set ruta 2]
end

```